



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**Escuela Politécnica Superior**

Grado De Ingeniería Mecánica

Trabajo de fin de grado:  
**SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN  
PROCESO DE CORTE ORTOGONAL:  
ESTUDIO DE LAS FUERZAS DE CORTE Y AVANCE**

**Autor:**

Pablo Luis Martínez Sanz

**Tutor:**

Xavier Soldani

Junio 2017

# ÍNDICE

RESUMEN.....	7
1. INTRODUCCIÓN .....	8
1.1. Motivación .....	8
1.2. Objetivos del proyecto.....	8
1.3. Estructura del documento .....	9
2. ESTUDIOS PREVIOS.....	10
2.1. Principales características de materiales dúctiles. ....	10
2.1.1. Métodos de rotura en materiales dúctiles.....	10
2.2. Proceso de mecanizado .....	13
2.2.1. Resumen histórico de los principales avances en el proceso de mecanizado. ....	14
2.2.2. Ventajas y desventajas de los procesos de mecanizados. ....	15
2.2.3. Proceso de corte ortogonal. ....	16
2.2.4. Formación de viruta.....	20
2.3. Aleaciones de aluminio .....	21
2.3.1. Ventajas: .....	22
2.3.2. Desventajas: .....	22
2.3.3. Clasificación de las aleaciones .....	22
2.4. Ley de Jonhson-Cook .....	22
2.5. Principios generales del método de elementos finitos .....	24
2.5.1. ETAPAS DEL MEF.....	25
3. REALIZACIÓN DEL MODELO ABAQUS.....	26
3.1. Presentación del problema.....	26
3.2. Módulo Part .....	27
3.2.1. Módulo Sketch.....	28
3.3. Módulo Property.....	30
3.3.1. Materiales:.....	30
3.4. Módulo Assembly .....	32
3.5. Módulo Step.....	32
3.6. Módulo Interaction.....	33
3.7. Módulo Load .....	33

3.8.	Módulo Mesh.....	34
3.8.1.	Mallado de la herramienta.....	34
3.8.2.	Mallado de la pieza de trabajo.....	35
3.9.	Módulo Job .....	35
3.10.	Módulo Visualization.....	36
4.	RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS.....	37
4.1.	Cálculo de las Fuerzas de corte y avance.....	37
4.1.1.	Avance de 0.12mm .....	37
4.1.2.	Avance de 0.16mm .....	41
4.1.3.	Avance de 0.24mm .....	45
4.2.	El efecto de los parámetros de Johnson-Cook .....	49
4.2.1.	$A' = A \times 1.2$ .....	49
4.2.2.	$A' = A \times 1.3$ .....	50
4.2.3.	$A' = A \times 1.4$ .....	51
4.2.4.	$A' = A \times 1.5$ .....	51
5.	CONCLUSIONES .....	53
6.	DESARROLLOS FUTUROS .....	56
7.	ANEXOS .....	58
	ANEXO A: IMÁGENES PROCESO DE CORTE.....	58
	El Cálculo de las Fuerzas de corte y avance .....	58
	El efecto de los parámetros de Johnson-Cook.....	61
	ANEXO B: Datos de fuerzas .....	63
	Avance 0.12 .....	63
	Avance 0.16 .....	63
	Avance 0.24 .....	63
	Parametrización de A .....	63
	ANEXO D: Estructura de los archivos .inp.....	64
8.	BIBLIOGRAFÍA .....	67

# ÍNDICE DE IMÁGENES

<i>Imagen 1: Proceso de corte ortogonal.</i>	8
<i>Imagen 2: Deformación vs tensión en materiales dúctiles y frágiles.</i>	10
<i>Imagen 3: Círculo de Mohr ensayo de tracción</i>	11
<i>Imagen 4: Probetas ensayo tracción</i>	12
<i>Imagen 5: Probetas ensayo compresión</i>	12
<i>Imagen 6: Probetas entalladas</i>	12
<i>Imagen 7: Probeta de entalla a 45º y probeta de Arcan</i>	13
<i>Imagen 8: parámetros corte ortogonal</i>	16
<i>Imagen 9: Fuerzas de corte del círculo de Merchant</i>	18
<i>Imagen 10: Zonas de calor en el mecanizado</i>	19
<i>Imagen 11: Influencia del aumento de la temperatura y la velocidad de deformación en la tensión</i>	23
<i>Imagen 12: Etapas MEF</i>	25
<i>Imagen 13: Create-Part</i>	27
<i>Imagen 14: Part-Workpiece</i>	28
<i>Imagen 15: Sketch-Workpiece</i>	28
<i>Imagen 16: Part-Tool</i>	29
<i>Imagen 17: Sketch-Tool</i>	29
<i>Imagen 18: Materiales</i>	30
<i>Imagen 19: Asignación de materiales</i>	31
<i>Imagen 20: Montaje pieza-herramienta</i>	32
<i>Imagen 21: Interacción superficie-superficie</i>	33
<i>Imagen 22: Mallado tool</i>	34
<i>Imagen 23: Mallado Workpiece</i>	35
<i>Imagen 24: Detalle nodos Workpiece</i>	35
<i>Imagen 25: Visualización modelo</i>	36
<i>Imagen 26: Fuerzas de corte y avance, <math>a=0.12\text{mm}</math> y <math>v=2.5\text{m/s}</math></i>	37
<i>Imagen 27: Fuerzas de corte y avance, <math>a=0.12\text{mm}</math> y <math>v=5\text{m/s}</math></i>	38
<i>Imagen 28: Fuerzas de corte y avance, <math>a=0.12\text{mm}</math> y <math>v=7\text{m/s}</math></i>	39
<i>Imagen 29: Fuerzas de corte y avance, <math>a=0.16\text{mm}</math> y <math>v=2.5\text{m/s}</math></i>	41
<i>Imagen 30: Fuerzas de corte y avance, <math>a=0.16\text{mm}</math> y <math>v=5\text{m/s}</math></i>	42
<i>Imagen 31: Fuerzas de corte y avance, <math>a=0.16\text{mm}</math> y <math>v=7\text{m/s}</math></i>	43
<i>Imagen 32: Fuerzas de corte y avance, <math>a=0.24\text{mm}</math> y <math>v=2.5\text{m/s}</math></i>	45
<i>Imagen 33: Fuerzas de corte y avance, <math>a=0.24\text{mm}</math> y <math>v=5\text{m/s}</math></i>	46
<i>Imagen 34: Fuerzas de corte y avance, <math>a=0.24\text{mm}</math> y <math>v=7\text{m/s}</math></i>	47
<i>Imagen 35: Comparativa <math>F_a</math> avance <math>0.24\text{mm}</math></i>	48
<i>Imagen 36: Comparativa <math>F_c</math> avance <math>0.24\text{mm}</math></i>	48
<i>Imagen 37: Fuerzas <math>A'=A \times 1.2</math></i>	49
<i>Imagen 38: Fuerzas <math>A'=A \times 1.3</math></i>	50
<i>Imagen 39: Fuerzas <math>A'=A \times 1.4</math></i>	51

<i>Imagen 40: Fuerzas <math>A'=Ax1.5</math></i>	51
<i>Imagen 41: Etapas de corte</i>	53
<i>Imagen 42: Johnson Cook vs Johnson Cook modified</i>	57
<i>Imagen 43: corte <math>a=0.12</math> <math>v=2.5m/s</math></i>	58
<i>Imagen 44: corte <math>a=0.12</math> <math>v=5m/s</math></i>	58
<i>Imagen 45: corte <math>a=0.12</math> <math>v=7m/s</math></i>	58
<i>Imagen 46: corte <math>a=0.16</math> <math>v=2.5m/s</math></i>	59
<i>Imagen 47: corte <math>a=0.16</math> <math>v=5m/s</math></i>	59
<i>Imagen 48: corte <math>a=0.16</math> <math>v=7m/s</math></i>	59
<i>Imagen 49: corte <math>a=0.24</math> <math>v=2.5m/s</math></i>	60
<i>Imagen 50: corte <math>a=0.24</math> <math>v=5m/s</math></i>	60
<i>Imagen 51: corte <math>a=0.24</math> <math>v=7m/s</math></i>	60
<i>Imagen 52: <math>A'=0.12</math>; <math>a=0.12</math> <math>v=2.5m/s</math></i>	61
<i>Imagen 53: <math>A'=0.13</math>; <math>a=0.12</math> <math>v=2.5m/s</math></i>	61
<i>Imagen 54: <math>A'=0.14</math>; <math>a=0.12</math> <math>v=2.5m/s</math></i>	62
<i>Imagen 55: <math>A'=0.15</math>; <math>a=0.12</math> <math>v=2.5m/s</math></i>	62
<i>Imagen 56: DESCRIPCION INP1</i>	64
<i>Imagen 57: DESCRIPCION INP2</i>	65
<i>Imagen 58: DESCRIPCION INP3</i>	66

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1: Energía de deformación</i>	11
<i>Ecuación 2: Ecuación de desgaste de Taylor.</i>	14
<i>Ecuación 3: Ecuación de desgaste de Gilbert</i>	15
<i>Ecuación 4: Johnson-Cook</i>	23
<i>Ecuación 5: Johnson Cook modified</i>	56
<i>Ecuación 6: Endurecimiento por deformación</i>	56
<i>Ecuación 7: Multiplicador de sensibilidad de frecuencia</i>	56
<i>Ecuación 8: Multiplicador Térmico</i>	57
<i>Ecuación 9: Ablandamiento térmico</i>	57

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Nomenclatura aleaciones Al</i>	22
<i>Tabla 2: Datos previos</i>	26
<i>Tabla 3: Propiedades AISI 1050</i>	26
<i>Tabla 4: Propiedades CBN</i>	27
<i>Tabla 5: Parámetros Johnson Cook AISI 1050</i>	31
<i>Tabla 6: Valores Jonhson-Cook Damage</i>	31
<i>Tabla 7: Energía de fractura</i>	31
<i>Tabla 9: Valores de <math>F_a</math> y <math>F_c</math> <math>a=0.12</math></i>	63
<i>Tabla 10: Valores de <math>F_a</math> y <math>F_c</math> <math>a=0.16</math></i>	63
<i>Tabla 11: Valores de <math>F_a</math> y <math>F_c</math> <math>a=0.24</math></i>	63
<i>Tabla 12:: Valores de <math>F_a</math> y <math>F_c</math> <math>a=0.12</math>, <math>v=2.5\text{m/s}</math> en función de <math>A'</math></i>	63

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

<i>Gráfica 1: Comparativa <math>F_a</math> avance 0.12mm</i>	40
<i>Gráfica 2: Comparativa <math>F_c</math> avance 0.12mm</i>	40
<i>Gráfica 3: Comparativa <math>F_a</math> avance 0.16mm</i>	44
<i>Gráfica 4: Comparativa <math>F_c</math> avance 0.16mm</i>	44
<i>Gráfica 5: Evolución de <math>F_c</math> y <math>F_a</math> en función de <math>A'</math></i>	52
<i>Gráfica 6: <math>F_a</math> en función del avance</i>	54
<i>Gráfica 7: <math>F_c</math> en función del avance</i>	54

## RESUMEN

En este trabajo se realiza una comparación entre los resultados obtenidos mediante la simulación numérica de un proceso de corte ortogonal sobre una chapa de aluminio AISI 1050, y los resultados teóricos recogidos en la tesis *MODELISATION ANALYTIQUE DE L'USINAGE A GRANDE VITESSE ET ETUDE DE L'USURE EN CRATERE – APPLICATION AU TOURNAGE*. Soldani, Xavier (2009). (Traducción castellano: Modelado del análisis de la herramienta a grandes velocidades y estudio del cráter – aplicado al torneado).

Analizando los resultados obtenidos, se evaluará la calidad del modelo, que permitirá extrapolar el proceso a otros materiales.

Para la realización del modelo, se ha empleado el software ABAQUS 6.12, considerando, no sólo aspectos mecánicos, sino también aspectos térmicos, y cinemáticos, todos ellos reflejados en modelo de rotura de Johnson-Cook, modelo con el que se realizará la simulación numérica.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Motivación

Los procesos de mecanizado son esenciales para la obtención de gran parte de los productos fabricados mundialmente, especialmente en la industria aeroespacial y del automóvil. Ya que incluso, en aquellos productos no fabricados por arranque (moldeo, prensado ...) es común incluir un proceso de cepillado o granallado para obtener un producto de mayor calidad.

Debido a la diversidad de aplicaciones de estos procesos, es de gran importancia, determinar las condiciones idóneas en las que se puede trabajar. Las simulaciones de los procesos de mecanizado enfocadas a las predicciones del comportamiento del proceso se realizan principalmente mediante el Método de Elementos Finitos (Özel, 2005), el proceso de corte ortogonal es una simplificación de las operaciones de mecanizado, que permite el estudio bidimensional de sus parámetros.

## 1.2. Objetivos del proyecto

En el Departamento de Ingeniería Mecánica se han realizado diversos estudios relativos a la modelización numérica de procesos de corte ortogonal.

El objetivo principal de este trabajo es la obtención de un modelo de elementos finitos, con resultados fiables, para ello, en este estudio, se va a analizar el efecto que tienen sobre las fuerzas de corte y avance, la variación de la velocidad y la velocidad de corte.

Este aspecto fue tratado en la tesis *“MODELISATION ANALYTIQUE DE L’USINAGE A GRANDE VITESSE ET ETUDE DE L’USURE EN CRATERE – APPLICATION AU TOURNAGE”* del que se han sacado los resultados teóricos de las fuerzas para un avance y velocidad dados. En su análisis, que se realiza sobre el material AISI 1050 y con una herramienta de CBN. Conociendo los resultados empíricos de este ensayo, posteriormente se podrá comprobar la sensibilidad del estudio.

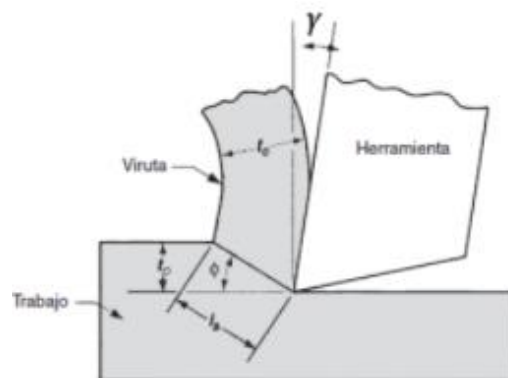


Imagen 1: Proceso de corte ortogonal.



### 1.3. Estructura del documento

Este trabajo se estructura en cinco capítulos y la bibliografía utilizada a lo largo del mismo.

- Este capítulo, el *Capítulo 1* es la introducción.
- En el *Capítulo 2* se introduce el estado del arte relativo al comportamiento de fallo de metales, los ensayos experimentales para obtener parámetros de fallo y el material utilizado.
- En el *Capítulo 3* se explica el procedimiento para la realización el modelo numérico utilizado, explicando todos los módulos utilizados en el mismo.
- En el *Capítulo 4* se presentan y analizan los resultados obtenidos en las distintas simulaciones comparándolos cuando sea posible con los resultados experimentales.
- En el *Capítulo 5* se encontrarán las conclusiones obtenidas.
- En el *Capítulo 6* se presentarán los desarrollos futuros.
- Por último, se encontrarán la bibliografía empleada para realizar el trabajo y los índices de imágenes, tablas, ecuaciones y gráficas, y anexos de la memoria.

## 2. ESTUDIOS PREVIOS

En este capítulo se repasarán los conocimientos necesarios para la comprensión y el desarrollo un modelo de proceso de mecanizado sobre una pieza metálica.

### 2.1. Principales características de materiales dúctiles.

Un material dúctil es aquel capaz de almacenar energía plástica una vez pasada la resistencia a fluencia ( $S_y$ ), una vez superado este límite, se produce una pérdida de propiedades, generalmente debido a la estricción, hasta el fallo o resistencia última ( $S_u$ ). Debido a esto, se suele trabajar sobre la resistencia a fluencia para calcular los métodos de fallo.

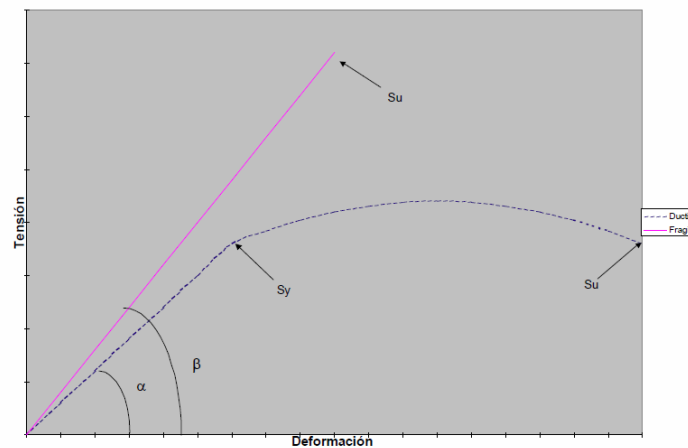


Imagen 2: Deformación vs tensión en materiales dúctiles y frágiles.

Los elementos dúctiles se caracterizan por tener un comportamiento parecido a tracción y a compresión, presentando un  $S_{y_t} \cong S_{y_c}$ .

#### 2.1.1. Métodos de rotura en materiales dúctiles

*Métodos teóricos*

- Teoría del Esfuerzo Normal Máximo (ENM)

En esta teoría se establece que el fallo en un material dúctil se produce siempre que el esfuerzo principal mayor ( $\sigma_1$ ) sea igual a la resistencia ( $S_y$ ).

Experimentalmente se sabe que el fallo se produce antes, ya que en un ensayo de cortadura pura el fallo se produce a  $0,6S_y$ .

- Teoría del Esfuerzo cortante máximo (ECM)

Esta teoría indica que el inicio de fluencia cuando el esfuerzo cortante máximo ( $S_{sy}$ ) es igual al esfuerzo cortante máximo en un ensayo de tracción. En este caso,  $\sigma_1 = F/A$ ;  $\sigma_2 = 0$ ;  $\sigma_3 = 0$ .

Representando este estado en el círculo de Mohr tenemos que  $\tau_{\max} = \sigma_1/2 = S_y/2$ .

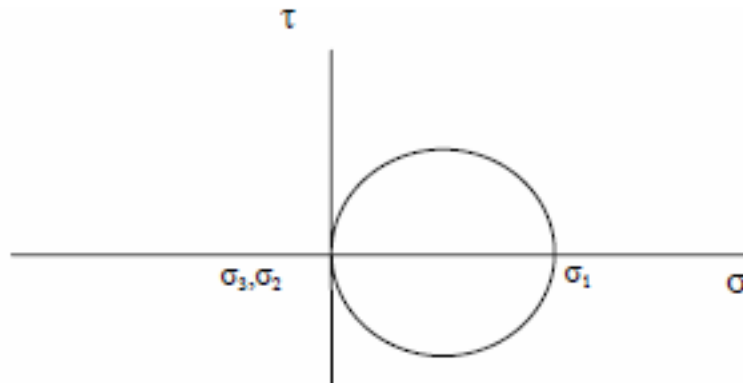


Imagen 3: Círculo de Mohr ensayo de tracción

Por tanto, esta teoría establece el fallo a cortadura pura cuando:

$$S_{sy} = 0,5S_y$$

- Teoría de la distorsión o teoría de Von Mises-Hencky (TVM)

Esta teoría surge de la afirmación que, en materiales dúctiles, las deformaciones por cargas hidrostáticas ( $\sigma_H$ ), se producen con cargas mucho mayores que las obtenidas por un ensayo de tracción simple, por lo que podrían despreciarse.

En un ensayo de tracción simple biaxial tenemos que la energía de deformación para este estado es:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2}} \rightarrow S_y^2 = \sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2$$

Ecuación 1: Energía de deformación

En caso de cortadura pura tenemos que:

$$S_{sy} = 0,577S_y$$

*Ensayos experimentales*

Los más comunes son:

- Probetas sometidas a tracción

Es un ensayo que tiene por objetivo definir la resistencia elástica, resistencia última y plasticidad del material cuando se le somete a fuerzas uniaxiales.

Se suelen realizar con una prensa hidráulica ya que permiten alcanzar la fuerza suficiente para producir la fractura de la probeta, controlar la velocidad de aumento de fuerzas y registrar las fuerzas,  $F$ , que se aplican y los alargamientos,  $\Delta L$ , que se observan en la probeta.

Estas probetas pueden ser cilíndricas o planas, para hipótesis de deformación plana, es decir, despreciando la deformación en el ancho de la placa respecto al resto de deformaciones.



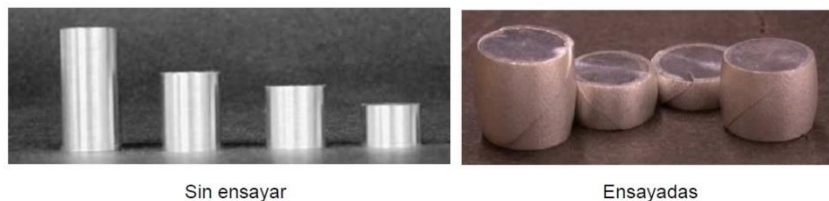
**CILINDRICAS**

**PLANAS**

*Imagen 4: Probetas ensayo tracción*

- Probetas sometidas a compresión

Uno de los ensayos más frecuentes para estudiar la fractura consiste en comprimir entre dos platos horizontales unos pequeños cilindros.



Sin ensayar

Ensayadas

*Imagen 5: Probetas ensayo compresión*

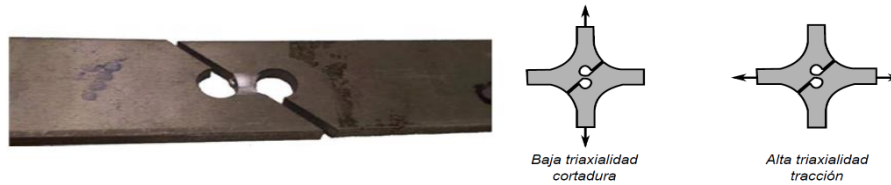
Como se puede observar estas probetas obtienen una forma de barril tras su ensayo la cual se debe a la fricción entre las placas horizontales y la probeta. Esta fricción es importante para el proceso de fractura y dificulta en gran medida la simulación numérica de este tipo de ensayos. También hay probetas con forma de cilindros entallados, con los que se consigue que la deformación sea muy localizada y se evite el efecto de la fricción que dificultaba la simulación numérica.



*Imagen 6: Probetas entalladas*

- Probetas sometidas a cortadura

Para realizar ensayos a cortadura las probetas más utilizadas son la entallada a 45°, que permiten obtener estados puros de cortadura en la zona central, lo que significa que el valor de la triaxialidad en estos ensayos será próximo a cero, y la probeta de Arcan, que permiten obtener resultados para valores de triaxialidad variables, en función de la aplicación de la carga.



*Imagen 7: Probeta de entalla a 45° y probeta de Arcan*

## 2.2. Proceso de mecanizado

“Mecanizado es el término usado para designar los procesos de manufactura con arranque de viruta” (Kalpakjian et al., 2002).

La realización de un proceso de mecanizado, requiere la intervención de tres elementos:

- **Pieza:** el término genérico "pieza" representa el elemento material objeto de la transformación durante la ejecución del proceso. En su estado inicial o preforma, la geometría de la pieza presenta unas creces, que suponen una sobredimensión respecto a las dimensiones finales a obtener. Esta sobredimensión es el material que se deberá eliminar durante las progresivas operaciones de arranque de material. Las operaciones intermedias se denominan de desbaste, y por lo general son operaciones de gran avance y bajo acabado, mientras que a las operaciones finales se las denomina de acabado, y son operaciones con bajo avance y alto acabado.
- **Herramienta:** una herramienta consta, en general, de una o varias aristas o filos. La cara de incidencia, enfrentada a la superficie mecanizada de la pieza y la cara de desprendimiento, aquella por la que se desprende el material eliminado o viruta. Las aristas se denominan también filos de corte. Según su construcción pueden considerarse enterizas cuando toda la herramienta es del mismo material y de placas cuando tiene una pieza removible denominada placa, que es la que sufre el desgaste, unida al mango mediante tornillos o bridas.
- **Máquina-Herramienta:** se denomina así al conjunto de dispositivos que permiten el desplazamiento relativo entre la pieza y la herramienta, así como la eliminación del material sobrante de la preforma.

El arranque de viruta se realiza mediante la penetración de una herramienta, cuyo material es de mayor dureza que el de la pieza a cortar. En general, la herramienta tiene dos componentes de movimiento. El primero corresponde al movimiento derivado del

movimiento principal de la máquina, denominado movimiento de corte, mientras que el segundo está relacionado con el avance de la herramienta, es decir, la cantidad de material que se elimina a movimiento de corte cero, este movimiento se denomina movimiento de avance.

### 2.2.1. Resumen histórico de los principales avances en el proceso de mecanizado.

El inicio del mecanizado se puede situar en el siglo XVIII cuando se aplicaba este proceso sobre madera, aunque de manera limitada.

No fue hasta principios del siglo XIX cuando se comenzó a expandir el uso del mecanizado sobre metales gracias a la revolución industrial y al desarrollo de las máquinas de vapor (Shaw, 1984), que permitían obtener una potencia suficiente para estos trabajos. A pesar del amplio despliegue de talleres y de nueva maquinaria durante este siglo, el proceso de arranque de material constituía un gran esfuerzo y un simple trabajo podía llevar una jornada completa.

Los primeros estudios sobre los procesos de mecanizado son atribuidos a Cocquilhat en 1851 determinando la cantidad de trabajo requerido para remover un volumen concreto de material en la operación de taladrado.

J. Time explicó en 1870 el proceso de formación de viruta, complementado con los estudios de Tresca en 1873. Muy destacable es la aportación de Mallock en 1881 y sus teorías sobre la formación de la viruta por cizallamiento, el efecto de la fricción sobre la herramienta y los efectos de los lubricantes en el proceso de corte. Aportes todavía hoy aceptados. Sin embargo, el primer análisis detallado del mecanismo de formación de viruta es debido a Piispanen (1948); este modelo es conocido como el modelo de plano de deslizamiento.

En la feria de París de 1900 se dio a conocer uno de los precursores del mecanizado actual, Frederick Taylor, quien presentó en dicha feria un mecanizado a gran velocidad en el que la herramienta no perdía sus propiedades ni en condiciones de altas temperaturas.

Taylor en 1906 fundamentó la fórmula de desgaste que aún se usa hoy en día y se muestra en la ecuación.

$$VT^n = C$$

*Ecuación 2: Ecuación de desgaste de Taylor.*

Donde V es la velocidad de corte, T es el tiempo de corte, n es una constante a definir, dependiendo del material del elemento y de la pieza, y C es una constante que engloba las condiciones de contorno fijas del sistema.

Otro gran avance en las herramientas de corte tuvo lugar en los años treinta cuando se comenzó a utilizar carburos cementados para la fabricación de herramientas, lo que derivó en una reducción de tiempos de mecanizado y una mayor duración de la herramienta.

Más adelante, en 1950, Gilbert desarrolló una ecuación generalizada basada en la teoría de Taylor que permitía la inclusión de las variables profundidad de pasada, P, y avance, A.

$$V = CT - nP - \gamma A - \alpha$$

*Ecuación 3: Ecuación de desgaste de Gilbert*

Todavía en la actualidad y gracias al continuo estudio sobre materiales, fuerzas de corte, temperaturas, dimensiones y condiciones de contorno en general, se sigue avanzando en el desarrollo de nuevas y más eficientes herramientas de corte.

### 2.2.2. Ventajas y desventajas de los procesos de mecanizados.

Entre las abundantes ventajas de los procesos de mecanizado con arranque de viruta cabe destacar la precisión dimensional, así como la complicada geometría que se puede conseguir. Además, las piezas mecanizadas obtienen un acabado superficial muy superior al conseguido mediante otros métodos de fabricación como la fundición.

Por otro lado, el tiempo empleado generalmente en el mecanizado de una pieza es mayor que el que se necesitaría para otro proceso de fabricación, por lo que para una gran producción puede resultar un proceso demasiado largo.

En el aspecto económico, el mecanizado resulta ventajoso cuando se requieren características especiales de superficie, especialmente si se trata de una pequeña producción (Kalpakjian et al., 2002). No obstante, el desperdicio de material que se produce durante el mecanizado hace que las ventajas económicas disminuyan.

Entre los parámetros que influyen sobre los procesos de mecanizado destacan los siguientes:

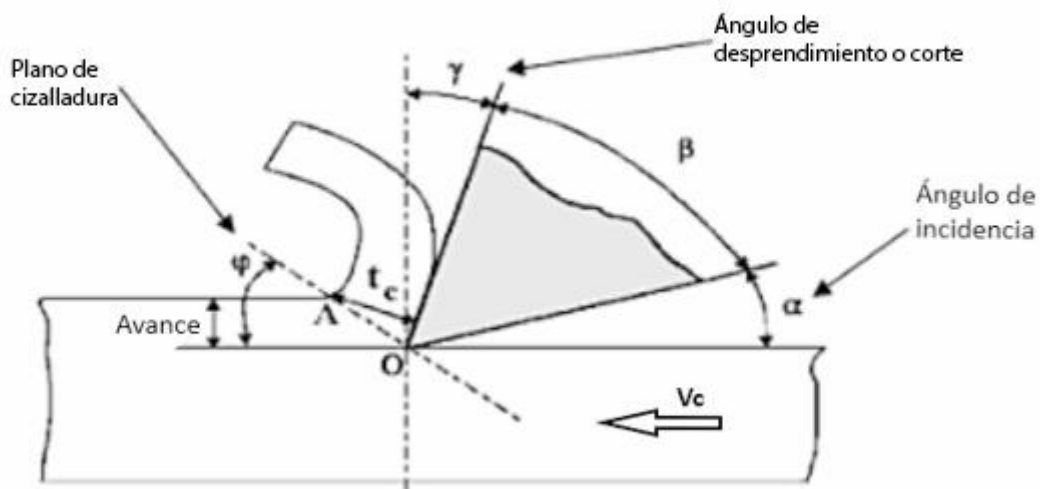
- Factores que pueden ser controlados por el operario, tales como la velocidad de rotación de la pieza o la herramienta, el avance longitudinal y la profundidad de corte, también llamado encaje axial.
- Factores que dependen de la herramienta, como el ángulo de corte o el desgaste de la misma.
- Factores dependientes de las propiedades del material a mecanizar, entre los que se incluyen los cambios de temperatura o el tipo de viruta que se produce.

Los tipos de corte empleados más frecuentemente en este proceso son las operaciones de torneado y de fresado. En la operación de torneado la pieza gira mientras la herramienta de corte hace los movimientos necesarios para la realización del corte. Por otro lado, el fresado se realiza mediante el giro de la herramienta y los movimientos longitudinales de la pieza a mecanizar.

### 2.2.3. Proceso de corte ortogonal.

El corte ortogonal es la simplificación bidimensional de los procesos principales de mecanizado. En este proceso se observan los siguientes parámetros:

*Principales movimientos en un proceso de corte ortogonal:*



*Imagen 8: parámetros corte ortogonal*

La geometría del corte ortogonal viene definida por tres ángulos característicos que son de gran influencia y por la profundidad de la pasada:

- Ángulo de corte o desprendimiento ( $\gamma$ ):

Es el ángulo formado por la cara de desprendimiento de la herramienta y la dirección perpendicular a la superficie mecanizada. Este ángulo puede tener un sentido positivo si es como en la figura (en sentido horario) o sentido negativo, si es en sentido contrario. Cuanto más positivo es este ángulo menor es el rozamiento entre la viruta y la herramienta. Por el contrario, cuanto más negativo es aumenta la robustez de la herramienta.



- Ángulo de incidencia ( $\alpha$ ):

Es el ángulo formado por la cara de incidencia de la herramienta (superficie de incidencia) y la superficie de la pieza ya mecanizada (superficie nueva). Si el valor del ángulo de incidencia disminuye aumentará el contacto existente entre la herramienta y la pieza, como consecuencia aumentará también la temperatura y disminuirá la vida de la herramienta. Por el contrario, si el valor del ángulo de incidencia aumenta se debilitará el filo de la herramienta.

- Ángulo de filo ( $\beta$ ):

Es el ángulo formado por las caras de incidencia y desprendimiento de la herramienta.

- Avance o espesor de viruta no deformada ( $a_c$ ):

Es el espesor del material que va a ser eliminado antes de sufrir deformación alguna.

- Ángulo de cizalladura ( $\phi$ ):

Es el ángulo formado por la superficie de la pieza y el plano de deslizamiento. Este un plano teórico en el que se produce la deformación del material de la pieza. En rigor se trata de una zona de deslizamiento más que de un plano propiamente dicho, sin embargo, en la práctica es frecuente reducir esta zona estrecha u a un plano.

- Espesor de viruta deformada ( $a_d$ ):

Es el espesor del material eliminado después de haber sufrido la deformación.

- Factor de recalcado ( $z$ ):

Es el cociente entre los espesores de viruta deformada y sin deformar. Es siempre mayor o igual que la unidad.

*Fuerzas generadas durante un proceso de corte:*

En corte ortogonal, con un contacto deslizante entre viruta y herramienta, el modelo de Merchant se basa en la minimización de la energía de corte utilizando el equilibrio de las fuerzas y de los momentos. En este proceso, la fuerza total  $F$  está contenida en el plano normal al filo de la herramienta.

$F$  se descompone en 3 sistemas de fuerzas según el círculo de Merchant

- Dirección del movimiento principal de corte y avance:  $F_t$  ( $F_c$ ) y  $F_n$  ( $F_a$ ).

$$F_t = F_c = F \cos(\tau - \gamma)$$

$$F_t = F_a = F \sin(\tau - \gamma)$$

Se observa que:  $\uparrow \gamma$  o  $\downarrow \tau \rightarrow F_a/F_c = \tan(\tau - \gamma)$

- Plano de cizalladura y normal:  $F_s$  y  $F_{sn}$

$$F_s = F \cos(\phi + \tau - \gamma)$$

$$F_{sn} = F \sin(\phi + \tau - \gamma)$$

- Superficie de la herramienta y normal:  $F_g$  y  $F_{gn}$

$$F_g = F \sin(\tau)$$

$$F_{gn} = F \cos(\tau)$$

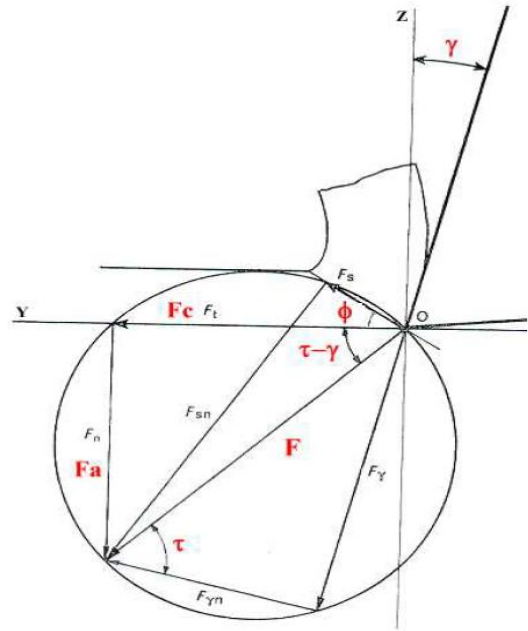


Imagen 9: Fuerzas de corte del círculo de Merchant

El trabajo debido a estas fuerzas genera altas temperaturas en la zona de corte que hacen que el rendimiento de la herramienta y el acabado de la pieza empeoren, por ello es importante refrigerar la zona utilizando fluidos de corte.

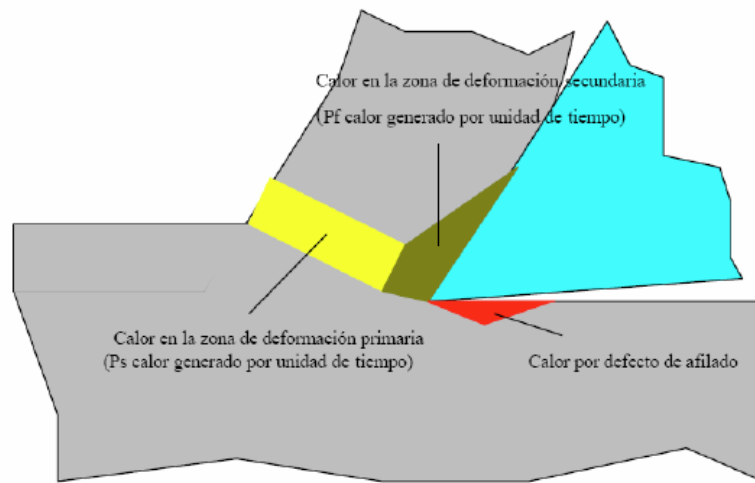
*Influencia de la temperatura en el mecanizado:*

Después de las fuerzas posiblemente el parámetro de mayor importancia en el mecanizado es la temperatura. La temperatura alcanzada en las operaciones de mecanizado es un parámetro crítico para la vida útil de la herramienta, la calidad de las superficies mecanizadas y en las propiedades mecánicas del material resultante.

Las energías de deformación y de fricción en los procesos de corte se disipan en forma de calor que contribuye al aumento de la temperatura en la zona de corte. Se producirán mayores temperaturas cuanto más duro sea el material a mecanizar, y mayores la profundidad de pasada y la velocidad. Según la teoría este será generado en las siguientes proporciones en las siguientes proporciones:

- Un 80% en la zona donde se produce la deformación plástica (zona primaria)
- Un 18% en el contacto pieza-herramienta (zona secundaria)

- Un 2% en el rozamiento de la punta de la herramienta con la superficie de la pieza.



*Imagen 10: Zonas de calor en el mecanizado*

*Influencia del desgaste en el mecanizado:*

El desgaste de la herramienta puede ser principalmente de dos tipos:

- **Prematuro:** ocurre de forma repentina de tal forma que no se puede prevenir. La causa de este tipo de fallo suele estar relacionada con una sobre carga de las fuerzas de corte sobre la herramienta, en particular en el entorno de la punta de la punta de la herramienta, provocando una rotura mecánica de una parte de esta herramienta.
- **Progresivo:** ocurre lentamente, y es debido al intercambio de átomos entre la viruta y la herramienta (difusión), o bien al rayado de la herramienta por parte de partículas más duras en la pieza (abrasión), o al contacto entre la herramienta y la pieza a altas presiones y temperaturas, provocando micro soldaduras entre ellas (adhesión).

Este desgaste se produce especialmente en dos zonas de la herramienta:

- **Desgaste de cara:** por el contacto de la viruta de la viruta con la superficie de desprendimiento.
- **Desgaste en el flanco:** por el rozamiento entre la superficie cortada de la pieza y la superficie de incidencia.

#### 2.2.4. Formación de viruta

Al arrancar el material de la pieza durante el proceso de corte, se crea un hilo de material, denominado viruta, que se deben de tener en consideración para evitar, tanto accidentes laborales como que esta afecte al mecanizado.

El tipo de viruta está determinado primordialmente por:

- a) Propiedades del material a trabajar.
- b) Geometría de la herramienta de corte.
- c) Condiciones de corte (profundidad de corte, velocidad de avance y velocidad de corte).

En general, es posible diferenciar cuatro tipos de viruta:

- Viruta continua:

La viruta continua se suele formar con materiales dúctiles a grandes velocidades de corte y/o grandes ángulos de ataque.

Aunque en general producen buen acabado superficial, las virutas continuas no siempre son deseables, en especial en las máquinas herramientas controladas por ordenador que son habituales hoy en día. Tienden a enredarse en el portaherramientas, los soportes y la pieza, así como en los sistemas de eliminación de viruta, y se debe parar la operación para apartarlas.

Este problema se puede aliviar con los rompevirutas, y cambiando los parámetros, como la velocidad de corte, el avance y los fluidos de corte.

- Viruta escalonada o segmentada:

Las virutas escalonadas (también denominadas virutas segmentadas o no homogéneas) son semicontinuas, con zonas de baja y alta deformación cortante.

Los metales con baja conductividad térmica y resistencia que disminuye rápidamente con la temperatura, como el titanio, muestran este comportamiento. Las virutas tienen un aspecto de viruta serrada.

- Viruta de borde recrecido o acumulado:

Una viruta de borde acumulado consiste en capas de material de la pieza que se depositan en forma gradual sobre la herramienta (de aquí el término acumulada).

La viruta puede formarse en la punta de la herramienta durante el corte. Al agrandarse, esta viruta se hace inestable y finalmente se rompe. Parte del material de la viruta es arrastrado por el lado que ve a la herramienta, y el resto se deposita al azar sobre la superficie de la pieza.

El proceso de formación y destrucción del borde acumulado se repite en forma continua durante la operación de corte, a menos que se tomen medidas para eliminarlo.

El borde acumulado se observa con frecuencia en la práctica. Es uno de los factores que afecta de manera más adversa al acabado superficial en el corte. De hecho, un borde acumulado cambia la geometría del filo de corte.

A medida que aumenta la velocidad de corte disminuye el tamaño del borde acumulado; de hecho, puede no formarse. La tendencia a la formación de borde acumulado se reduce también con cualquiera de los siguientes métodos: disminuir la profundidad de corte; aumentar el ángulo de ataque; usar un buen fluido de corte.

- Viruta discontinua:

Las virutas discontinuas consisten en segmentos que pueden fijarse, de forma firme o floja, entre sí. Se suelen formar con materiales frágiles en la pieza, porque no tienen la capacidad para absorber las grandes deformaciones constantes que se presentan en el corte, materiales de la pieza que contienen inclusiones e impurezas duras.

- Velocidades de corte muy bajas o altas.
- Grandes profundidades de corte.
- Ángulos de ataque bajos.
- Falta de un fluido de corte eficaz.
- Baja rigidez de la máquina de la herramienta.

Una viruta posee dos superficies: una en contacto con la cara de la herramienta (cara de ataque) y otra de la superficie original de la pieza. La cara de la viruta hacia la herramienta es brillante o bruñida, y ello se debe al frotamiento de la viruta al subir por la cara de la herramienta. La otra superficie de la viruta no se pone en contacto con cuerpo alguno. Esta superficie posee un aspecto rasgado y áspero, que se debe al propio proceso de corte.

## 2.3. Aleaciones de aluminio

Las aleaciones de aluminio son uno de los metales más usados en procesos de ingeniería, especialmente en el sector aeronáutico y automovilístico, principalmente por la diferencia de densidad respecto a sus principales rivales, lo que ha permitido reducir el peso de las piezas fabricadas. Esta diferencia de peso es de gran importancia en los sectores ya mencionados dado que principalmente están enfocados al transporte y dicha una disminución de peso se transforma en un menor consumo de combustible y por lo tanto menor contaminación.

Las principales ventajas y desventajas de las aleaciones de aluminio respecto a sus competidores en el mercado son:

### 2.3.1. Ventajas:

- Menor densidad
- Facilidad para su procesamiento en operaciones como mecanizado o extrusión.
- Inoxidable
- Alta soldabilidad

### 2.3.2. Desventajas:

- Alto coste de fabricación (alrededor de 50% mayor que en el acero)
- Propiedades elásticas inferiores a las del acero
- Puede sufrir corrosión electrolítica
- Problemas de fatiga

### 2.3.3. Clasificación de las aleaciones

Las aleaciones de aluminio se clasifican en grupos en función de los principales elementos que se han sido usados para obtener la aleación. Para diferenciarlas se usan denominaciones de 4 números en las que:

- El primer dígito indica la familia o grupo al que pertenece.
- El segundo dígito indica las impurezas o si existen cambios respecto a la aleación original.
- Los últimos dígitos indican la pureza del aluminio utilizado.

Familia de aluminio	Designación
Aluminio puro, 99% mínimo	1xxx
Aluminio-Cobre	2xxx
Aluminio-Manganeso	3xxx
Aluminio-Silicio	4xxx
Aluminio-Magnesio	5xxx
Aluminio-Magnesio-Silicio	6xxx
Aluminio-Zinc	7xxx
Otros elementos	8xxx

Tabla 1: Nomenclatura aleaciones Al

En el caso de la aleación a utilizada en el modelo, AISI 1050, es una aleación de Aluminio puro, 99% mínimo, sin cambios en la aleación, respecto al estándar, y al 50% de pureza en el aluminio utilizado.

## 2.4. Ley de Johnson-Cook

Los modelos constitutivos de material son un conjunto de ecuaciones que describen el comportamiento plástico de los materiales en función de unos parámetros dependientes de las características del maquinado en cada caso (deformación, velocidad de deformación y temperatura). Además de estos parámetros aparecen una serie de constantes, halladas experimentalmente, que dependen del material.

El modelo de Johnson-Cook reproduce el comportamiento del material sujeto a grandes deformaciones, altas temperaturas y altas velocidades de deformación. Este modelo tiene en cuenta las condiciones más relevantes para el estudio que nos ocupa como son las propiedades de: elasticidad, plasticidad, viscosidad y térmicas; de ahí el nombre que se le da técnicamente a este tipo de ecuaciones: termo-visco-plástica. Así, la tensión de fluencia definida por este modelo es:

$$\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) = [A + B \cdot \epsilon^n] \cdot \left[ 1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_f - T_0} \right)^m \right]$$

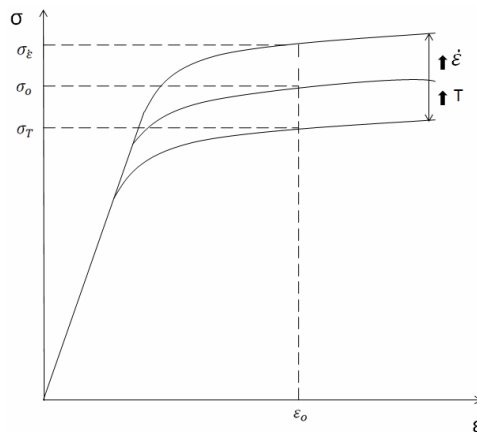
*Ecuación 4: Johnson-Cook*

Donde:

- A representa el límite elástico a temperatura ambiente en condiciones de baja velocidad de deformación.
- B y n representan el efecto de endurecimiento por deformación del material.
- C y m representan la sensibilidad del material a la velocidad de deformación y a la temperatura, respectivamente.
- $\epsilon$  es la deformación plástica efectiva,  $\dot{\epsilon}$  la velocidad de deformación plástica efectiva,  $\dot{\epsilon}_0$  la velocidad de deformación de referencia, en este caso  $5,77 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ ,
- $T_f$  la temperatura de fusión del material y  $T_0$  la temperatura ambiente.

El segundo grupo de corchetes representa el efecto debido a la viscosidad del material, que depende de la velocidad de la deformación plástica. Al aumentar la velocidad de deformación plástica del material, la tensión aumenta, lo que da lugar al desplazamiento de la curva tensión-deformación positivamente en dirección vertical, y, por lo tanto, al endurecimiento del material.

El tercer y último grupo de corchetes representa el efecto debido a las condiciones térmicas del material. Al aumentar la temperatura (T) la tensión disminuye (ver Imagen 10), dando lugar a un ablandamiento del material debido a la activación térmica de las dislocaciones.



*Imagen 11: Influencia del aumento de la temperatura y la velocidad de deformación en la tensión*

La obtención de las constantes del modelo en cada caso se realiza ajustando la curva de comportamiento a aquellas curvas que se obtienen al realizar varios ensayos a diferentes temperaturas y velocidades de deformación.

## 2.5. Principios generales del método de elementos finitos

El Método de Elementos Finitos (MEF) es un método de cálculo numérico basado en ecuaciones diferenciales para resolver problemas relacionados con la ingeniería. Para dar solución a un problema basándose en el Método de Elementos Finitos, se deben tener en cuenta las siguientes asunciones:

- Una función continua se aproxima a una serie de funciones finitas y mediante ese número finito de funciones se puede llegar a una solución equivalente de la función continua.
- El objeto a estudiar estará dividido en pequeñas partes a los que se denomina “elementos”.
- Estos elementos estarán definidos mediante puntos y conexiones llamados “nodos”.
- Cada elemento contiene las propiedades del material, de manera que se supone un comportamiento simplificado dentro de los mismos.
- La unión en una pieza de todos sus nodos y elementos es a lo que se denomina “mallado”, por lo tanto “mallar” una pieza significa crear los elementos que van a definir a la misma.
- Las funciones continuas definidas, son resueltas en cada nodo, asumiendo que cualquier punto interno al elemento puede calcularse como variables nodales del elemento.
- Como variables nodales entendemos los grados de libertad de los nodos: tres grados de desplazamiento y tres grados de rotación.

La suma de todos los elementos representa el objeto de estudio, al que se llama cuerpo mallado, consiguiendo una gran aproximación con la realidad a la hora de realizar el estudio de los elementos finitos. Cada elemento interactúa con sus elementos vecinos mediante una serie de ecuaciones que llevan como variables las incógnitas del problema a estudiar. Estas ecuaciones serán lineales o no dependiendo de las propiedades definidas del material y las condiciones de contorno del problema. Resolviendo cada una de las ecuaciones dentro de los elementos, se obtiene la solución global del problema.



- Las Figuras formadas por formas geométricas y no se encuentren malladas, serán llamados cuerpos rígidos.

### 2.5.1. ETAPAS DEL MEF

El ciclo del análisis por elementos finitos incluye cinco etapas diferenciadas:

- Modelización: esta etapa es también llamada pre-procesamiento. En este punto se diseña el objeto a analizar, así como las condiciones de contorno.
- Análisis: en este punto es en que se hace el verdadero cálculo numérico del modelo de elementos finitos.
- Interpretación: aunque todos los demás puntos son los que hacen posible el análisis, esta es en realidad la etapa más importante. Aquí es donde se da forma a los datos obtenidos, se interpreta su significado y se decide si el análisis es admisible o si por el contrario se debe proceder a realizar algún cambio. Desde esta etapa se puede volver atrás hasta el concepto, la modelización o incluso hasta una nueva interpretación de los mismos datos.
- Aceptación: es el momento de realizar las conclusiones finales sacadas del análisis e interpretación de los datos obtenidos.

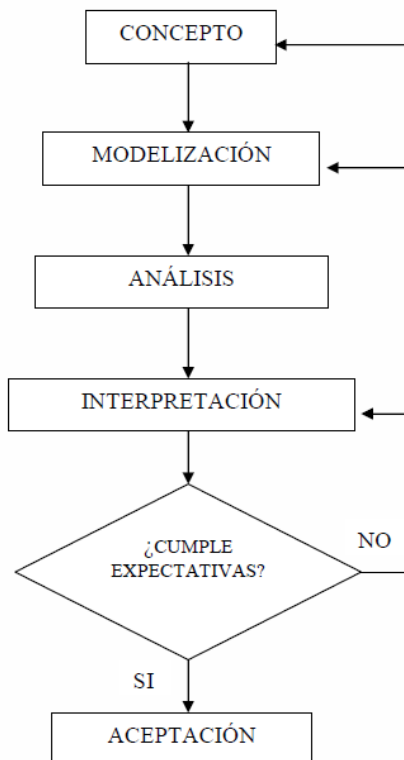


Imagen 12: Etapas MEF

### 3. REALIZACIÓN DEL MODELO ABAQUS

#### 3.1. Presentación del problema

El estudio se realizará basándose en los parámetros obtenidos de “*MODELISATION ANALYTIQUE DE L’USINAGE A GRANDE VITESSE ET ETUDE DE L’USURE EN CRATERE – APPLICATION AU TOURNAGE*”.

Donde se estudia la relación del avance, el coeficiente de fricción y las fuerzas de corte y avance para cada velocidad, en este caso se estudiará el siguiente rango de resultados:

V (m/min)	Ángulo de corte $\gamma$ (°)	Avance (mm/rev)	Fuerza de corte (N)	Fuerza de avance (N)	Coeficiente de fricción experimental
150	5	0.12	398	133	0.43
150	5	0.16	531	169	0.42
150	5	0.24	796	249	0.41
300	5	0.12	386	124	0.42
300	5	0.16	543	194	0.46
300	5	0.24	799	252	0.41
420	5	0.12	387	113	0.39
420	5	0.16	523	167	0.42
420	5	0.24	796	227	0.38

Tabla 2: Datos previos

Para ello, se realizarán tres modelos con avance de 0.12, 0.16 y 0.24mm cada uno, en los que se estudiarán las fuerzas de corte y avance a las velocidades de 150, 300 y 420m/min o lo que es lo mismo 2.5, 5, 7m/s. En cada uno de los casos, se ajustará el coeficiente de fricción al indicado en la tabla.

El estudio teórico se realizó con una herramienta de CBN, con un ángulo de corte de 5°, y un material de AISI 1050. Para determinar las propiedades de los materiales experimentales, el problema utilizará los mismos parámetros. Las características de los materiales son las siguientes:

AISI 1050 (pieza de trabajo)	
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	7850
Módulo de Young (Pa)	2.05e11
Coeficiente de Poisson (-)	0.29
Calor específico (J/kg·C°)	486
Fracción de calor inelástica (-)	0.9
Conductividad térmica (W/(m·C°))	51.5

Tabla 3: Propiedades AISI 1050

CBN (Herramienta)	
Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	14500
Módulo de Young (Pa)	$5.60\text{e}11$
Coefficiente de Poisson (-)	0.22
Calor específico ( $\text{J/kgC}^\circ$ )	220
Fracción de calor inelástica	0.9
Conductividad térmica ( $\text{W/(m}\cdot\text{C}^\circ)$ )	34

Tabla 4: Propiedades CBN

### 3.2. Módulo Part

En este módulo se establece el diseño de las partes del problema, si bien, no se establece ninguna relación entre ellas.

Para diseños complejos se permite la importación desde software de CAD más complejos, dada la simplicidad de diseño del problema, el diseño se realiza desde el módulo Sketch del propio programa.

El modelo tendrá dos “parts” o piezas, la pieza de trabajo (Workpiece), y la herramienta (tool).

Al ser un estudio bidimensional, cada pieza es 2D y deformable, con una dimensión aproximada de 0.001.

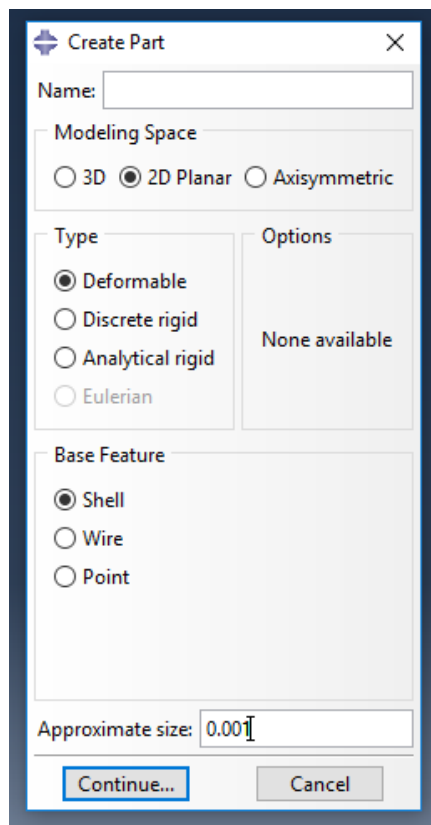
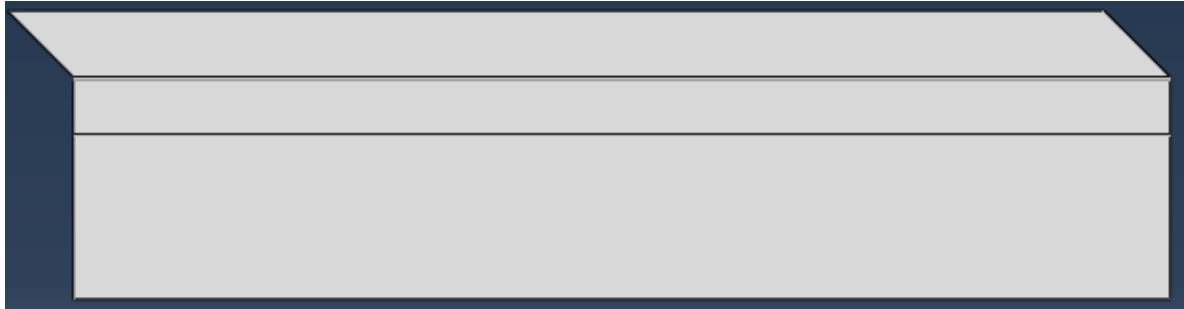


Imagen 13: Create-Part

### 3.2.1. Módulo Sketch

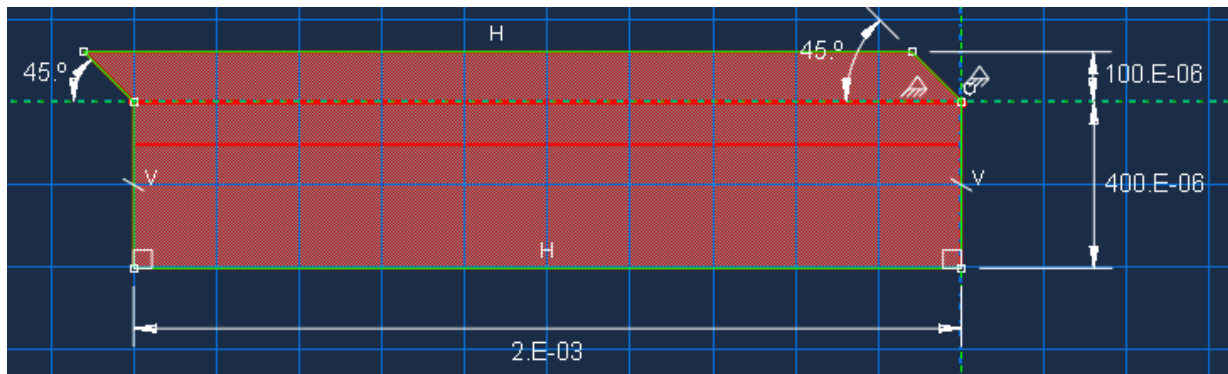
*Pieza de trabajo:*



*Imagen 14: Part-Workpiece*

Para el estudio se crea un cubo de 2mm de largo, lo suficiente para permitir que las fuerzas se estabilicen, y 0.4mm sobre el que se levanta la parte a cortar, que cambiará de tamaño en función del avance a estudiar. Para obtener unos resultados más precisos, se ha hecho una partición de 1mm, donde se hará un mayado fino, explicado posteriormente.

En la parte del avance, se ven dos partes, un rectángulo de 2mm\*4μm, donde posteriormente se pondrán unos índices de rotura menor que será la parte donde choque la herramienta, y otra hasta completar el avance en cada caso, con un ángulo de 45° para facilitar la formación de viruta.



*Imagen 15: Sketch-Workpiece*

Herramienta:



Imagen 16: Part-Tool

Para la herramienta, la altura debe ser suficientemente grande para pasar el avance y no hay ninguna restricción sobre el largo, por lo que se ha procedido realizando un cuadrado de 0.5x0.5mm, sobre el que posteriormente se han añadido el ángulo de corte de 5° establecido en las condiciones iniciales y el de incidencia, que se ha tomado el valor típico de 5°. El redondeo se ha hecho de 20μ.

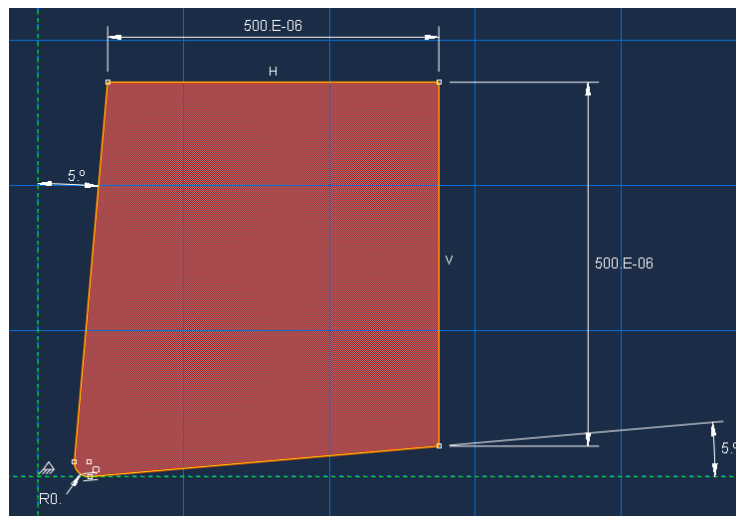


Imagen 17: Sketch-Tool

### 3.3. Módulo Property

En este módulo se definen las propiedades de los materiales para, posteriormente, asignarles cada material a las piezas creadas en el módulo anterior.

En este caso, se han creado 4 materiales, 3 para la pieza de trabajo y el de la herramienta.

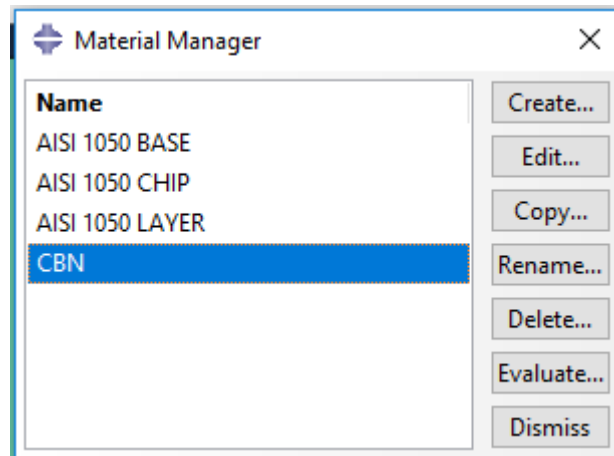


Imagen 18: Materiales

Esto es debido a que la energía que tiene que soportar cada parte de la pieza de trabajo, es diferente, y para conseguir un modelo realista, se han puesto energías de fractura diferentes en cada partición.

Las unidades de trabajo utilizadas son las del sistema internacional (SI), ya que el diseño se realiza en metros. Es decir, fuerza (N), longitud (m), masa (kg), temperatura (K), tiempo (s), energía (W), trabajo (J)

#### 3.3.1. Materiales:

*AISI 1050:*

Las propiedades del material, aparecen ya descritas en la tabla 3: Propiedades AISI 1050. Además, es necesario incluir valores de comportamiento del material, estos son, los que afectan al modelo de rotura del material.

En este estudio se ha elegido el modelo de rotura por Johnson-Cook, el cual reproduce con gran exactitud el endurecimiento de metales cuando se dan altas velocidades y deformaciones. Los parámetros que aparecen en esta ecuación, dependen sólo del material, para el AISI 1050. Para la obtención de los parámetros de rotura, se ha procedido a utilizar el estudio “*CALIBRATION OF THE JOHNSON-COOK FAILURE PARAMETERS AS THE CHIP SEPARATION CRITERION IN THE MODELLING OF THE ORTHOGONAL METAL CUTTING PROCESS*” de Keyan Wang, B. Eng. (2016), en el que se obtuvieron diferentes resultados en función de la operación a realizar con aluminio AISI 1050.

Para el caso de corte ortogonal se tienen los siguientes valores:

A (Pa)	B (Pa)	C (-)	n	m (-)	T <sub>f</sub> (K)	T <sub>0</sub> (K)	$\dot{\epsilon}_0$ (s <sup>-1</sup> )
615800000	667600000	0.0134	0.255	1.078	1623	298	1

Tabla 5: Parámetros Johnson Cook AISI 1050

Además, para el modelado en ABAQUS, es necesario introducir unos parámetros de comportamiento del material durante la rotura del mismo, estos valores son experimentales, y se han obtenido del mismo estudio de Wang Keyan (2016), estos son:

D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	Tensión de referencia
0.04	1.03	-1.39	0.002	0.46	1

Tabla 6: Valores Johnson-Cook Damage

Otro de los parámetros importantes es la energía de fractura en cada material, en este caso, como queremos diferenciar tres partes con un comportamiento diferente, se deben tener tres materiales diferentes. Para encontrar estos valores, no se puede hacer de otra forma que, comprobando entre los valores más frecuentes, que son del rango de 12500-60000. Tras comprobar con diferentes valores, se ha llegado a los siguientes resultados:

Material	Energía de fractura
AISI 1050 BASE	30000
AISI 1050 CHIP	60000
AISI 1050 LAYER	12500

Tabla 7: Energía de fractura

CBN:

Como este material se la asignará a la herramienta, que se comportará como un sólido rígido, las propiedades introducidas, son exclusivamente las del material, que aparecen en la Tabla 4: Propiedades CBN.

Posteriormente, hay que asignar cada material a las piezas creadas:

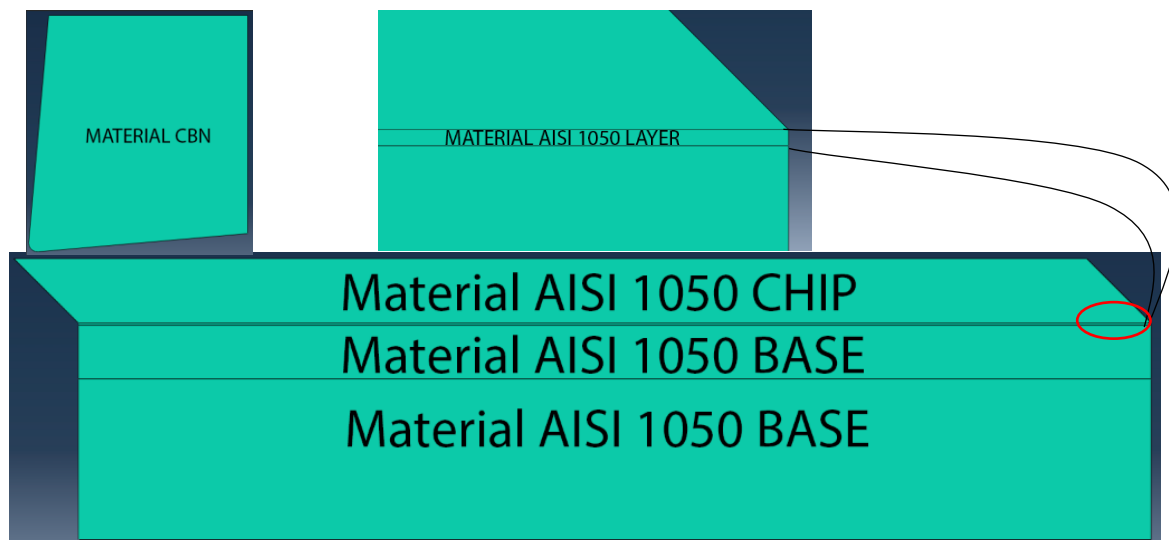
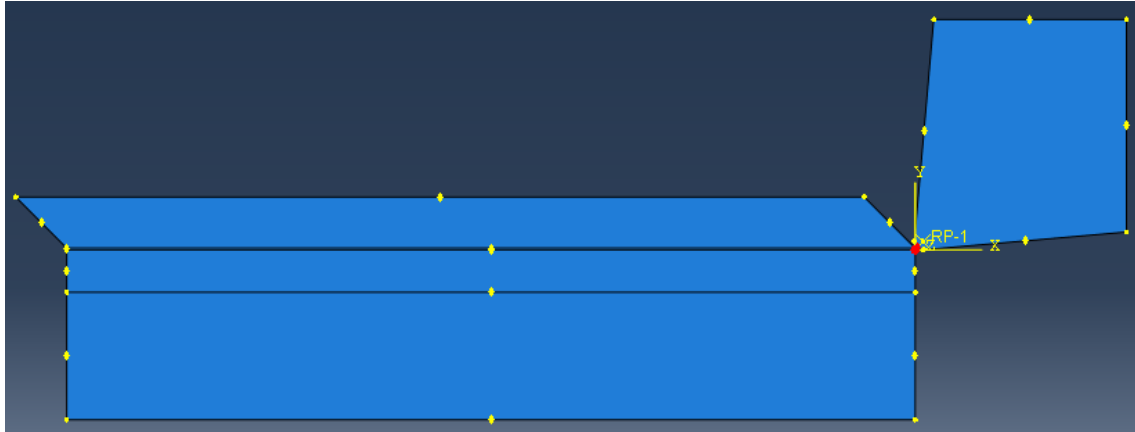


Imagen 19: Asignación de materiales

### 3.4. Módulo Assembly

Una vez se han creado las piezas y se han asignado los materiales, en este módulo se establece la posición relativa entre ellas al inicio de la simulación.

En este caso, la herramienta se sitúa en su posición de acercamiento a la pieza, a una distancia aproximada de  $5\mu\text{m}$ , y a la altura del layer.



*Imagen 20: Montaje pieza-herramienta*

### 3.5. Módulo Step

En este módulo se define el tiempo en el que se aplicarán las cargas y las condiciones de contorno que se definirán posteriormente en los módulos interaction y load.

En este estudio, es necesario crear dos "Steps", un Step "Initial" predefinido para el tiempo en que la herramienta está en reposo, y otro "Step-1" en el que la herramienta se moverá realizando el corte. Además, en cada step, se definen, la duración de este, y el tiempo entre cada cálculo de los parámetros deseados. En este caso, se ha establecido un tiempo de 0.0006s, tiempo suficiente para que las fuerzas de corte y avance se estabilicen en el caso de la velocidad menor y el avance mayor. El tiempo entre cada cálculo es de  $5\text{e-}10\text{s}$  de forma que se puedan realizar con precisión los cálculos necesarios. Por último, también se definen los cálculos que se quieren, en este caso, se ha escogido calcular las tensiones, fuerzas y energía, restricciones, desplazamientos, velocidades y aceleraciones y temperaturas de forma que se pueda comprobar que las condiciones puestas se cumplen, contrastar la coherencia de los valores obtenidos, y observar la evolución de estos a lo largo del problema.



### 3.6. Módulo Interaction.

En este módulo se establecen las interacciones entre los elementos, es decir, las condiciones de contacto entre las “parts”.

En este paso, se define la herramienta como cuerpo rígido, para ello, dentro de “constrain manager”, se crea la restricción de Rigid body, y se selecciona la herramienta.

También en este módulo se indica la interacción que hay entre la parte de la viruta y el filo de la herramienta, ya que, de otra forma, el programa no identifica ese contacto.

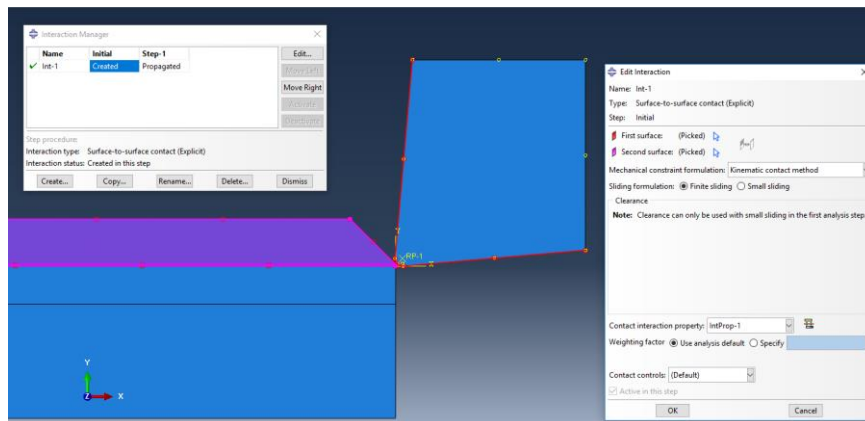


Imagen 21: Interacción superficie-superficie

Además, para cada velocidad y avance, habrá que modificar el coeficiente de rozamiento entre la herramienta y la pieza de trabajo en la ventana “interaction property manager”, dado que se trata de un corte, el contacto será tangencial entre la herramienta y la pieza, por lo que se crea la interacción “contact” → tangencial behavior con el coeficiente de rozamiento indicado en el estudio para cada caso.

### 3.7. Módulo Load

Al igual que en el módulo anterior se establecían las relaciones entre las piezas, en este módulo, se establecen las condiciones de contorno del modelo.

Para el estudio, es necesario restringir el movimiento de la pieza de trabajo, de forma que, al moverse la herramienta, la base esté fija, para ello, se debe empotrar, esta operación se hace en “boundary condition manager”, creando un “encastre” y seleccionando los lados de la base, es importante no seleccionar la pieza y seleccionar sólo los lados, ya que los pequeños desplazamientos que pueda haber en la pieza en la realidad, no aparecerían y podrían dar lugar a errores en el programa.

Dentro de “boundary condition manager” también se restringen los movimientos de la herramienta, de forma que solo se pueda mover horizontalmente, sin permitir giros ni desplazamiento vertical, simulando la función del brazo sobre el que se fija la herramienta en un caso real, y se le da velocidad a la herramienta, para cada

caso, teniendo en cuenta que se trabaja en unidades del SI, por lo que se deben poner en m/s, y no en m/min como aparecían en el estudio teórico.

Por último, en este módulo, también se define la temperatura de trabajo, es decir, los 298K que se establecieron en el módulo “properties” como temperatura de referencia.

### 3.8. Módulo Mesh

Antes de lanzar la simulación, es necesario mallar el modelo, es decir, dividir las piezas del modelo en un número finito de elementos. El número de nodos influye en la duración de la simulación y la obtención de resultados por lo que para reducir el tiempo de cálculo sin sacrificar los resultados se realizará un mallado más fino en las zonas críticas del modelo y se reducirán los nodos en las zonas de menor interés.

Para optimizar el mallado, este se realiza por partes, variando el número de nodos y el tipo de elemento en función de la cercanía del elemento al corte. Es por ello, que en el módulo “Part”, se realizó una partición de la base en dos partes.

Para crear el mallado, primero se asigna la distribución de nodos en los bordes de las piezas, para posteriormente, elegir la forma en que estos se van a unir, creando los elementos.

#### 3.8.1. Mallado de la herramienta.

Para el mallado de la herramienta, dado que está definida como un cuerpo rígido, no es necesario un mallado muy fino. En este caso, los elementos más pequeños están en la punta, con una distancia de  $10\mu\text{m}$  y los más grandes, lejos de esta, con una distancia de  $70\mu\text{m}$ . Dado que los nodos variaban su distancia, se ha seleccionado un mallado libre en el que dominen los cuadriláteros, obteniendo el siguiente resultado:

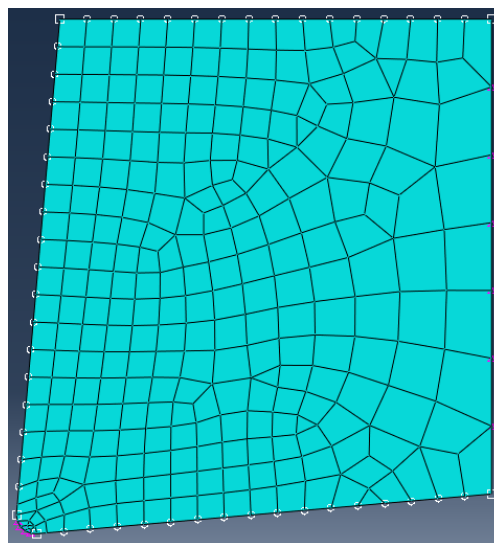


Imagen 22: Mallado tool

### 3.8.2. Mallado de la pieza de trabajo.

PARA el mallado del “workpiece”, se debe escoger un mallado lo más fino posible en las zonas del layer, el chip y la partición superior de la base ya que son las zonas críticas del problema, con una distancia entre nodos de  $10\mu\text{m}$ , la mínima permitida. Luego, la zona más alejada de la base, ya que se ve menos afectada por el paso de la herramienta, se le asigna un mallado menos fino con una distancia entre nodos de  $30\mu\text{m}$ . El mallado en esta pieza es estructurado y sólo con cuadriláteros para obtener los resultados más precisos posibles.

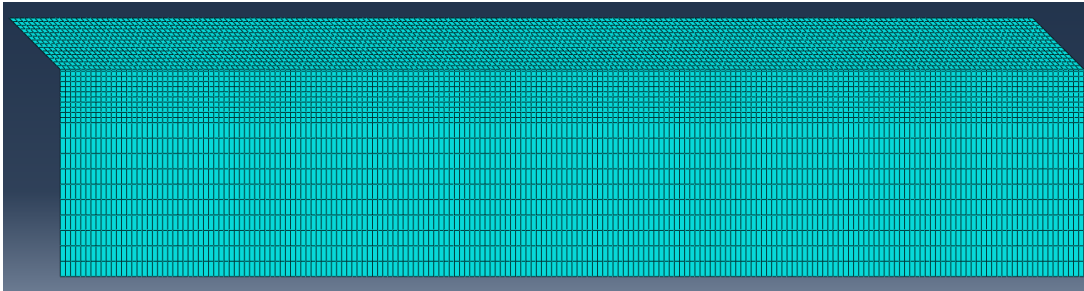


Imagen 23: Mallado Workpiece

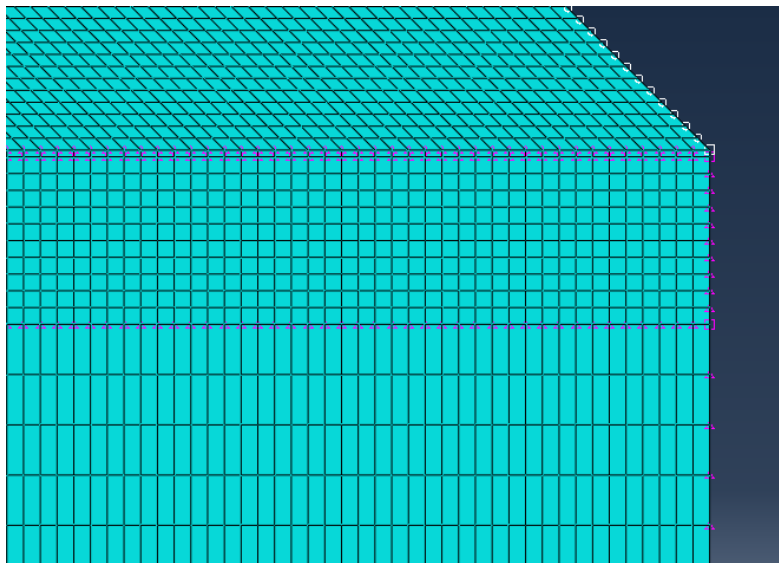


Imagen 24: Detalle nodos Workpiece

## 3.9. Módulo Job

Este módulo tiene la función de ejecutar la simulación y de este modo comenzar con los cálculos, guardando todo el trabajo realizado anteriormente.

Además, en este módulo se crean los archivos .inp, que son archivos de texto donde aparece representado el problema y permiten realizar modificaciones en las propiedades de los materiales, interacciones y condiciones de contorno de manera más rápida. LA estructura de estos archivos está desarrollada en el anexo C.

### 3.10. Módulo Visualization

Una vez creado y ejecutado el modelo, se utiliza este módulo, cuya función es la de mostrar los resultados obtenidos una vez realizada la simulación. De igual modo se puede reproducir una recreación del problema simulado y obtener gráficas, donde se observe, por ejemplo, la evolución del corte, como vemos a continuación.

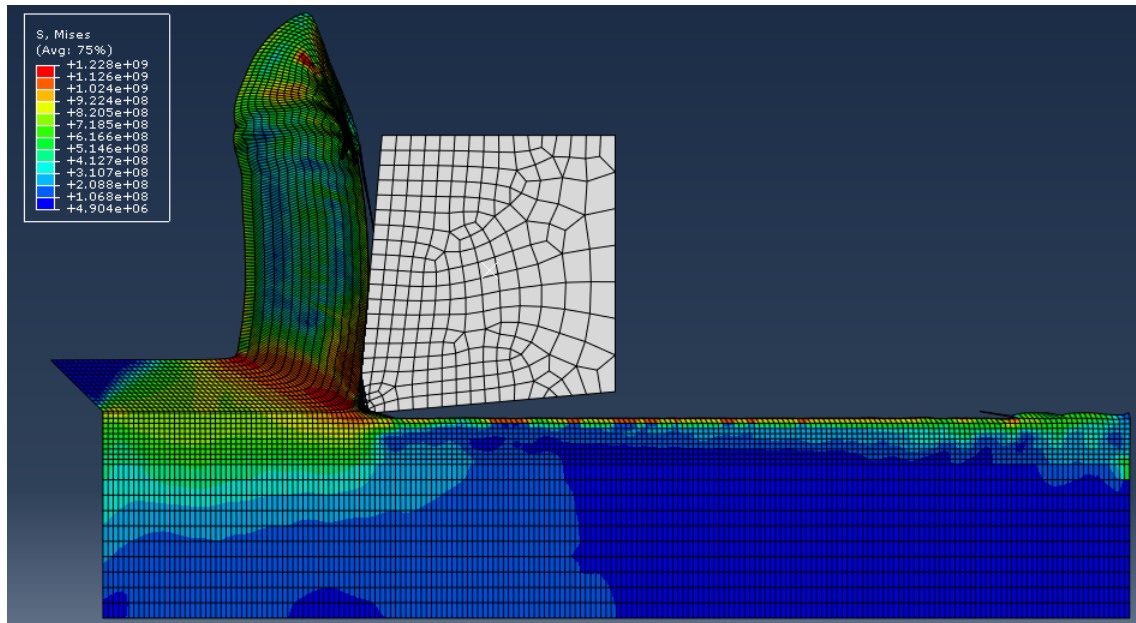


Imagen 25: Visualización modelo

## 4. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS.

### 4.1. Cálculo de las Fuerzas de corte y avance

Tras realizar el modelo, en el módulo “visualization” se puede observar la gráfica de la evolución de las fuerzas de corte y de avance, y exportar esos valores, de forma que se puedan sacar los valores representativos para el estudio y compararlos con los valores teóricos. Estos valores, se pueden exportar a una hoja de cálculo, donde obtener los valores representativos de cada modelo.

#### 4.1.1. Avance de 0.12mm

Para el avance de 0.12mm, se han obtenido las siguientes gráficas de fuerzas.

- $v=2.5\text{m/s}$

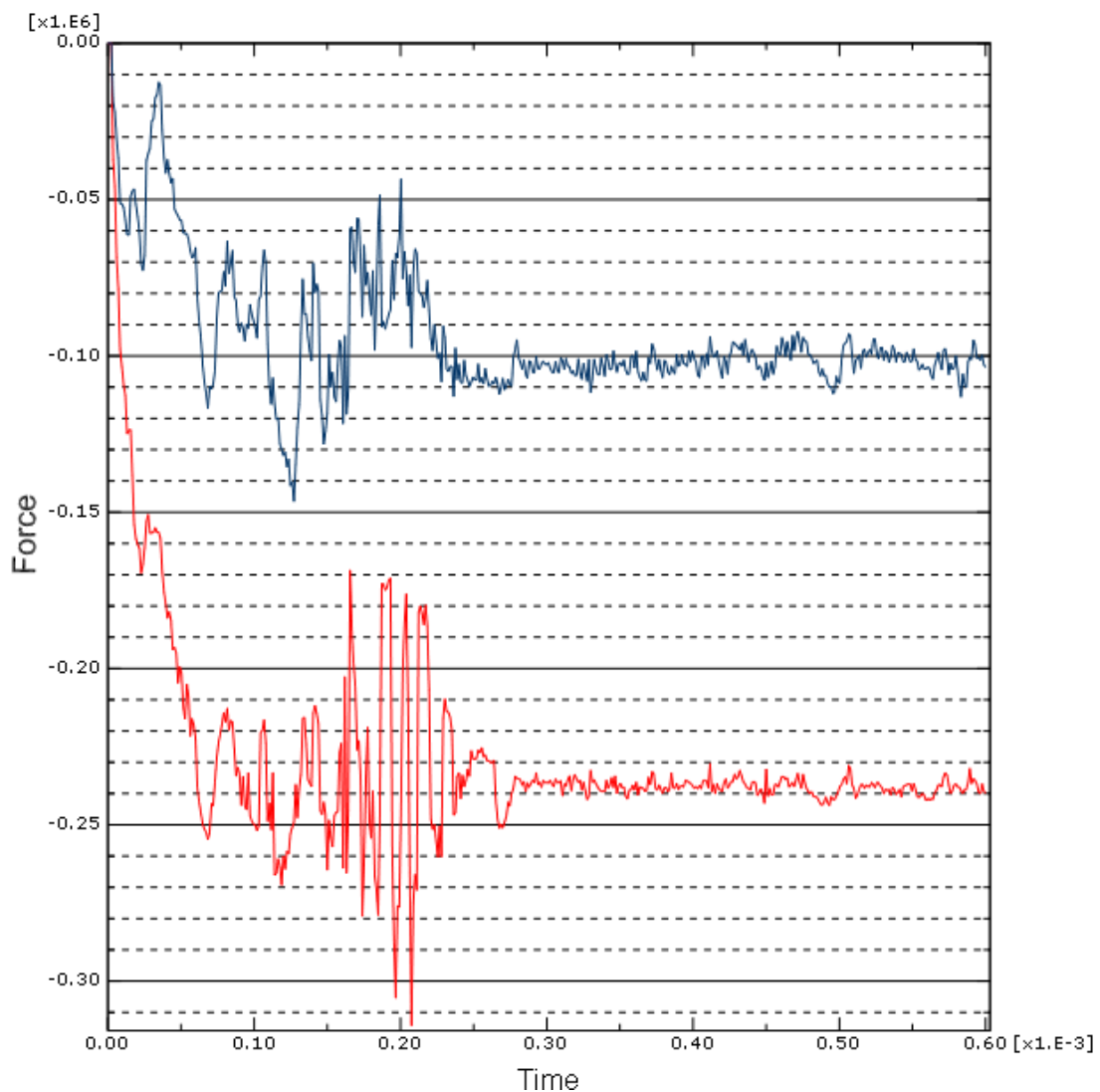


Imagen 26: Fuerzas de corte y avance,  $a=0.12\text{mm}$  y  $v=2.5\text{m/s}$

Como se observa, la fuerza que se obtiene es de valor negativo, porque es la fuerza requerida, la que realiza la herramienta.

En azul se observa la fuerza de avance y en rojo la fuerza de corte, mayor que la anterior

Se observa en ambas, un primer tramo en el que la fuerza aumenta bruscamente, debido al primer contacto entre la pieza y la herramienta. A continuación, un tramo inestable en el que se empieza a cortar el material, pero no se ha desarrollado la viruta. Finalmente, un tramo en el que ambas fuerzas se estabilizan, cuando la viruta ya se ha formado y se tiene un contacto continuo entre la viruta y la superficie de desprendimiento de la herramienta.

Los valores obtenidos son:

- $F_a = 105\text{KN}$
  - $F_c = 240\text{KN}$
- $v = 5\text{m/s}$

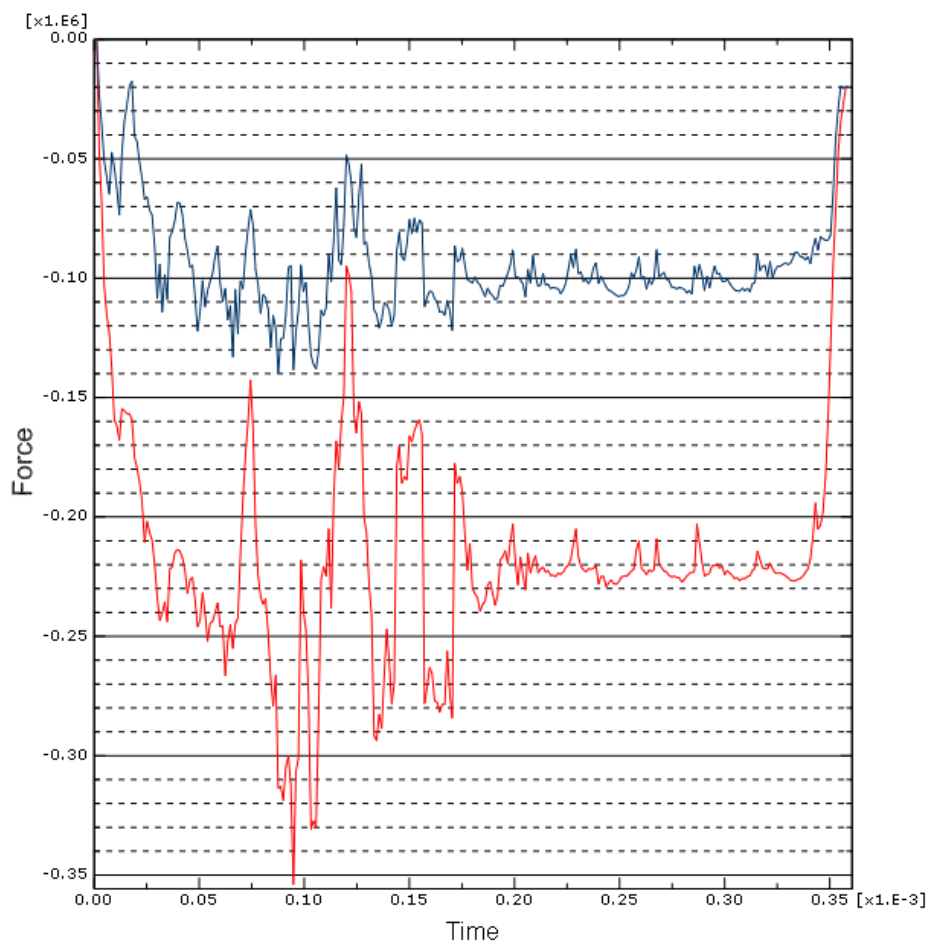


Imagen 27: Fuerzas de corte y avance,  $a=0.12\text{mm}$  y  $v=5\text{m/s}$

De nuevo, se observan las mismas etapas claramente diferenciadas, pero en este caso, como el tiempo de trabajo ha sido suficiente para acabar el corte, se observa también la última zona, en la que la viruta tiende a rajarse del resto de la pieza, por lo que los valores útiles para el estudio serán los anteriores a que este suceso llegue a producirse, alrededor de los  $0.31 \times 10^{-3}$  s.

Los valores obtenidos son:

- $F_a = 100 \text{ KN}$
  - $F_c = 222 \text{ KN}$
- $v = 7 \text{ m/s}$

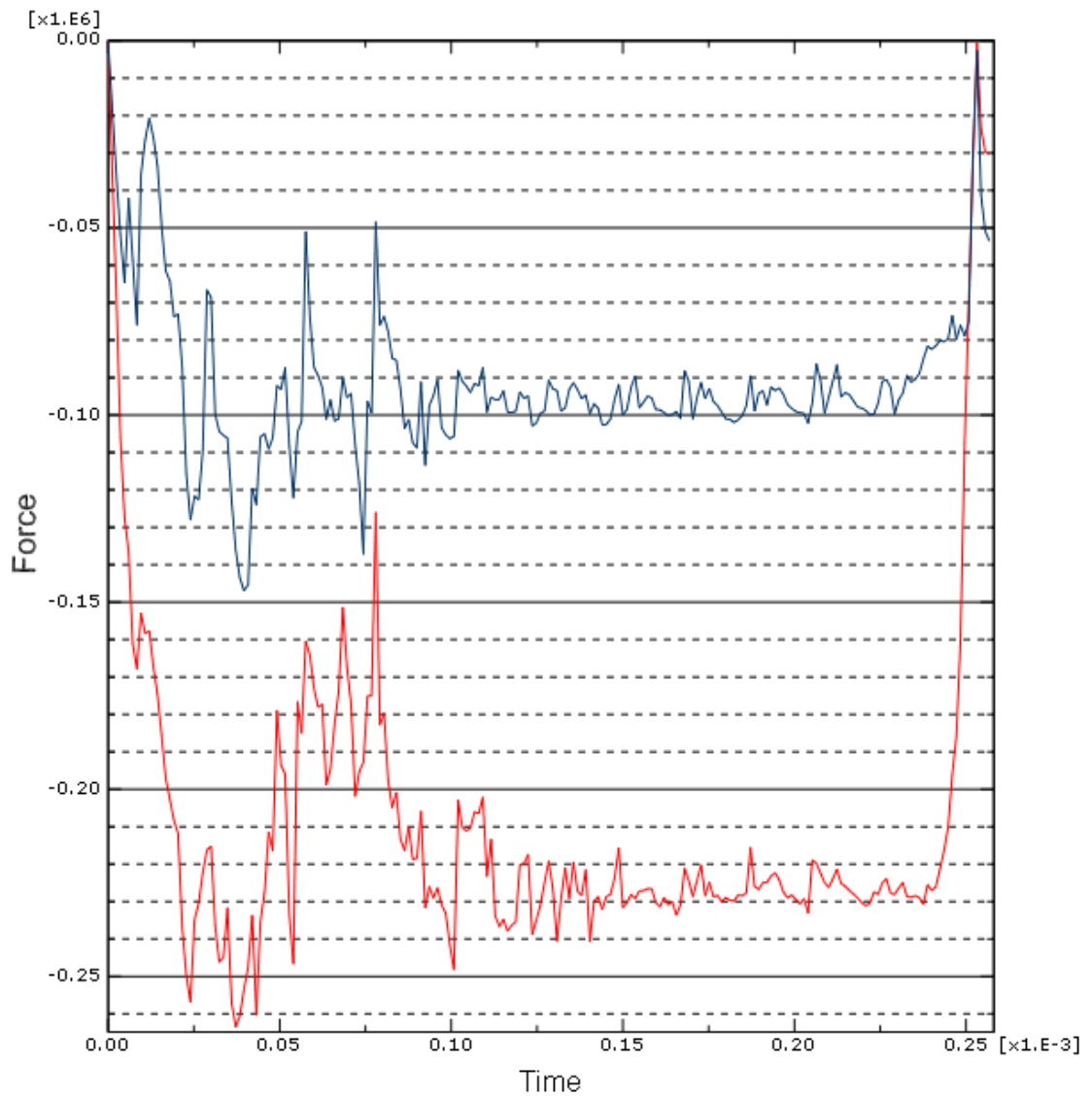


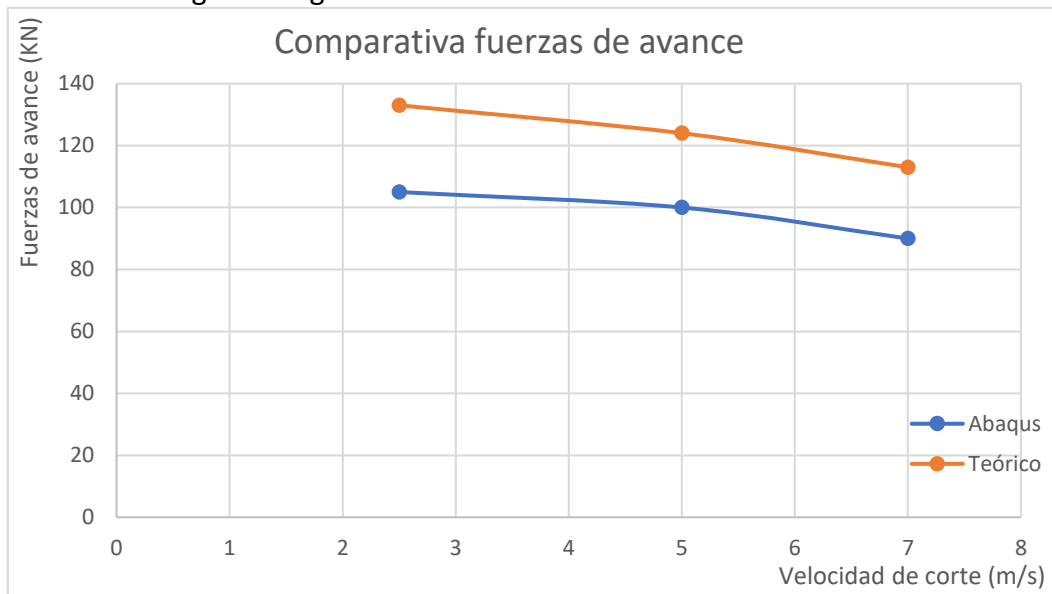
Imagen 28: Fuerzas de corte y avance,  $a = 0.12 \text{ mm}$  y  $v = 7 \text{ m/s}$

En este caso, se vuelve a producir la rotura de material al final del proceso, y se siguen observando las 4 etapas diferenciadas, si bien, se observa claramente que las fuerzas, a velocidades mayores no se estabilizan de igual forma que a velocidades menores, esto se analizará en conclusiones.

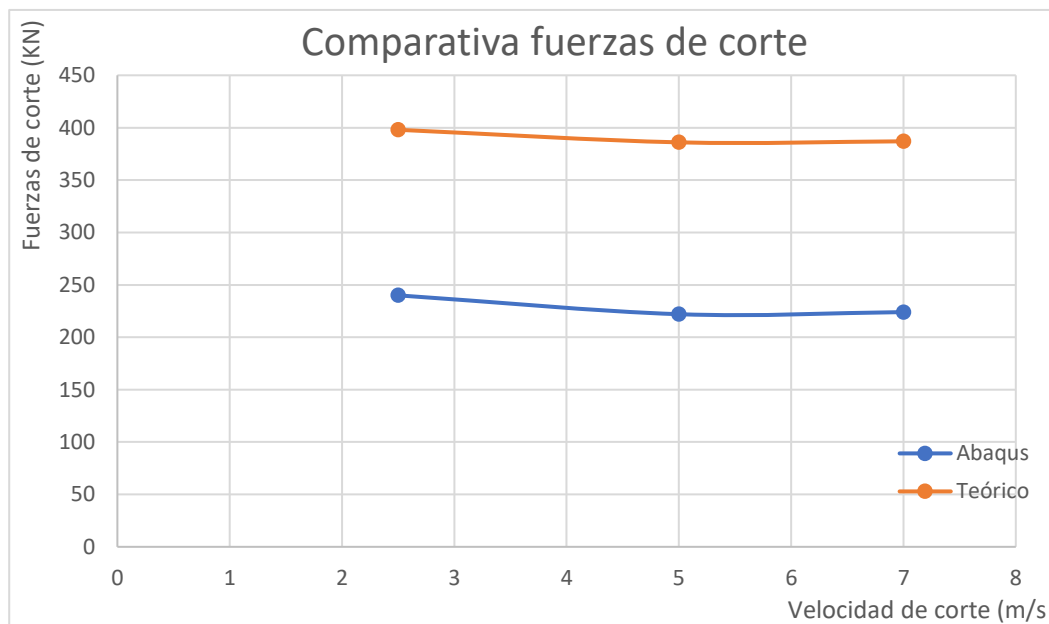
Las fuerzas de corte y avance en este caso fueron:

- $F_a = 90\text{KN}$
- $F_c = 224\text{KN}$

Comparando los resultados teóricos y los de la simulación para un mismo avance, se obtienen las siguientes gráficas:



Gráfica 1: Comparativa  $F_a$  avance 0.12mm



Gráfica 2: Comparativa  $F_c$  avance 0.12mm



Se observa que, si bien, los valores siguen una misma distribución, en ambos casos, hay un gap entre los valores teóricos por lo que posteriormente se realizará un estudio de la influencia de los parámetros de rotura de Johnson-Cook en el valor de las fuerzas obtenidas mediante la simulación.

#### 4.1.2. Avance de 0.16mm

Para el avance de 0.16mm, se han obtenido las siguientes gráficas de fuerzas:

- $v=2.5\text{m/s}$

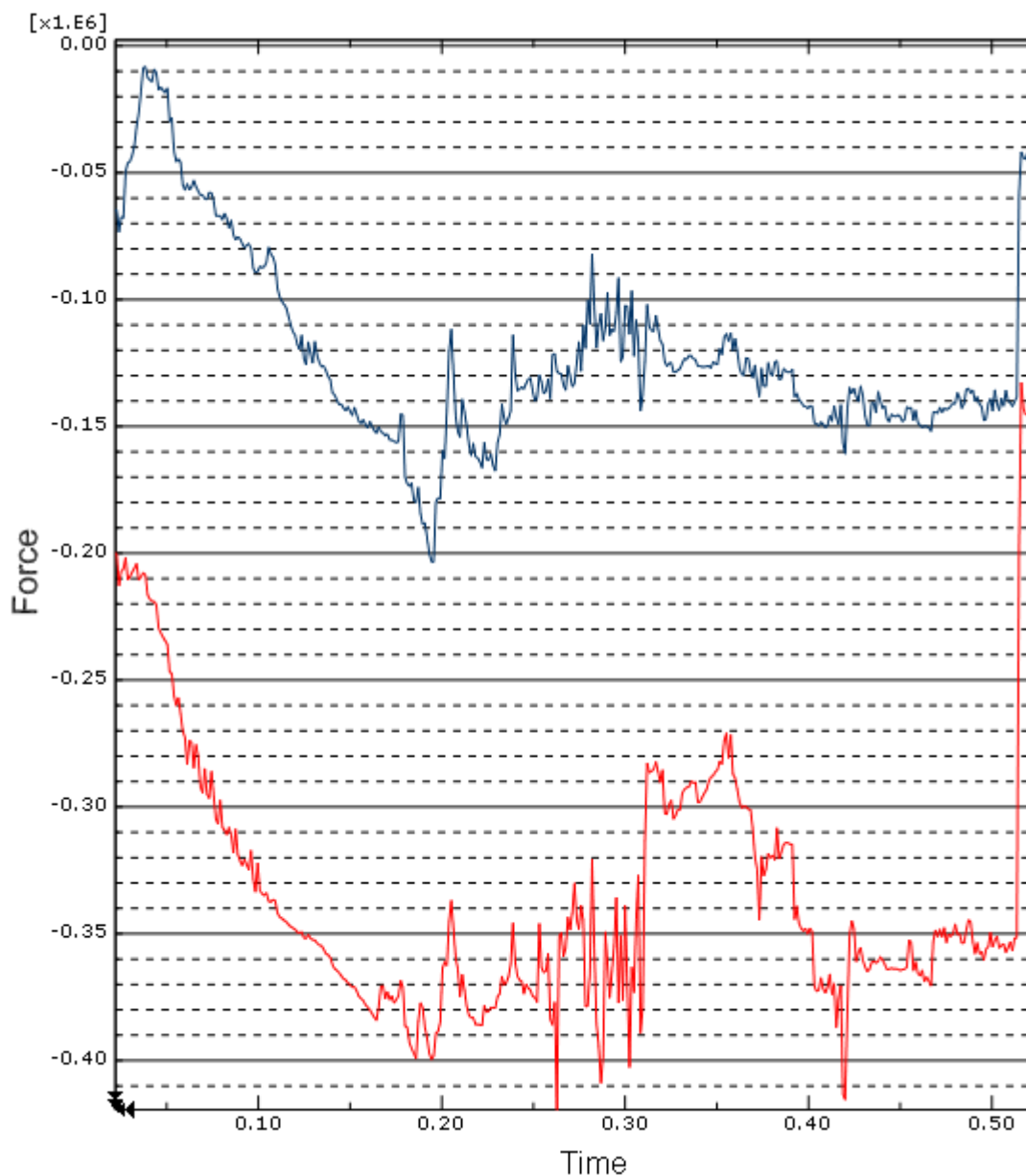


Imagen 29: Fuerzas de corte y avance,  $a=0.16\text{mm}$  y  $v=2.5\text{m/s}$

Para el caso de 0.16mm de avance, se observa un aumento de tiempo en las dos primeras etapas, la de rotura del material y la de creación de la viruta, esto es lógico por el aumento del espesor que cortamos.

Las fuerzas en este caso son las siguientes:

- $F_a = 146\text{KN}$
  - $F_c = 360\text{KN}$
- $v = 5\text{m/s}$

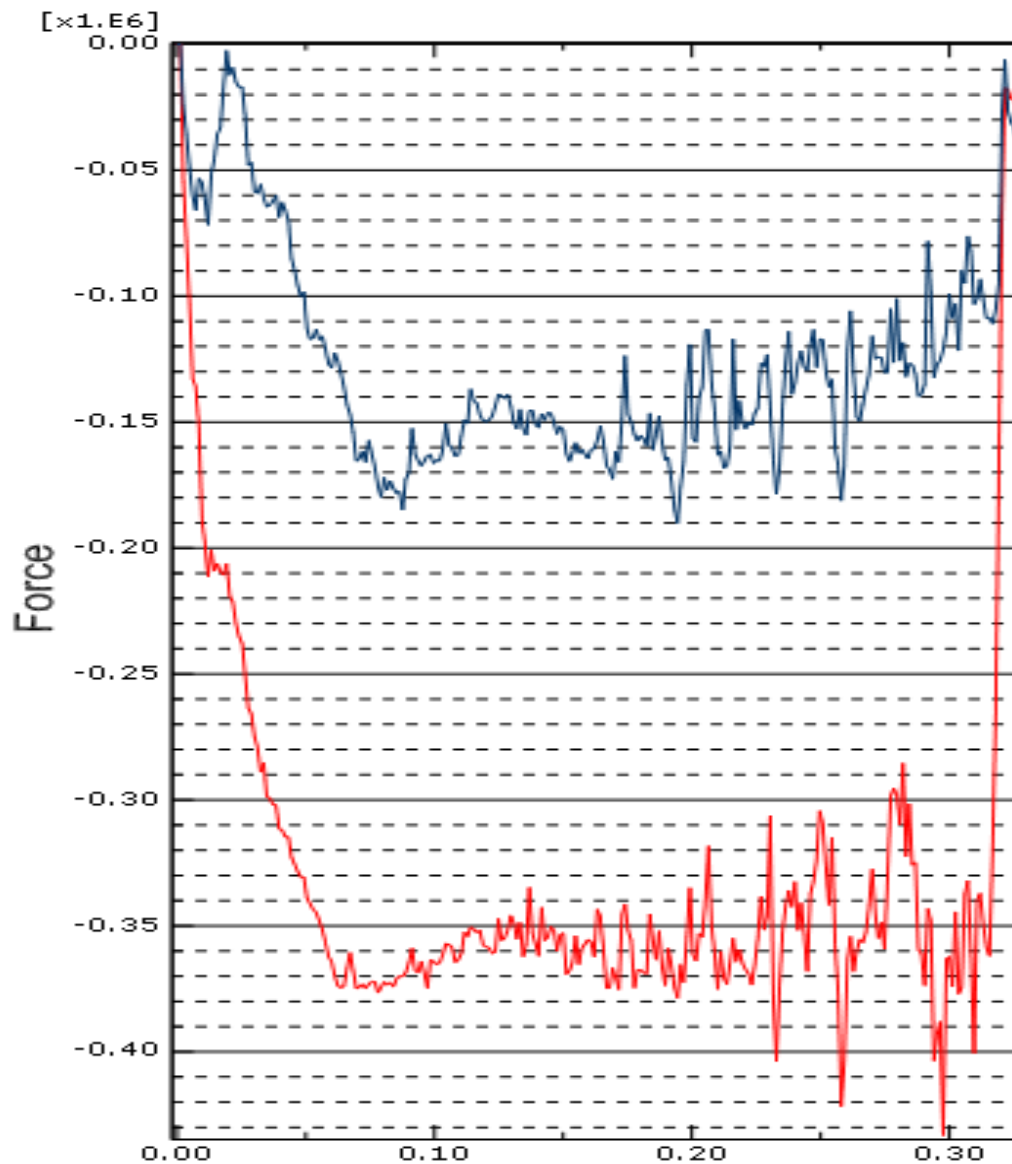


Imagen 30: Fuerzas de corte y avance,  $a=0.16\text{mm}$  y  $v=5\text{m/s}$

Igualmente, en este caso se observa un aumento de las dos primeras etapas, disminuyendo el tiempo en el que la viruta se desarrolla de forma estable. Además, esta zona tiene una parte la que la viruta se desarrolla de manera continua, entre los tiempos 0.10 y 0.20 ms y posteriormente, se descompone, como se puede observar en el Anexo B. Las fuerzas en el proceso son de:

- $F_a = 162 \text{ KN}$

- $F_c = 360 \text{ KN}$

Mayores que en el caso del avance de 0.12mm

- $v = 7 \text{ m/s}$

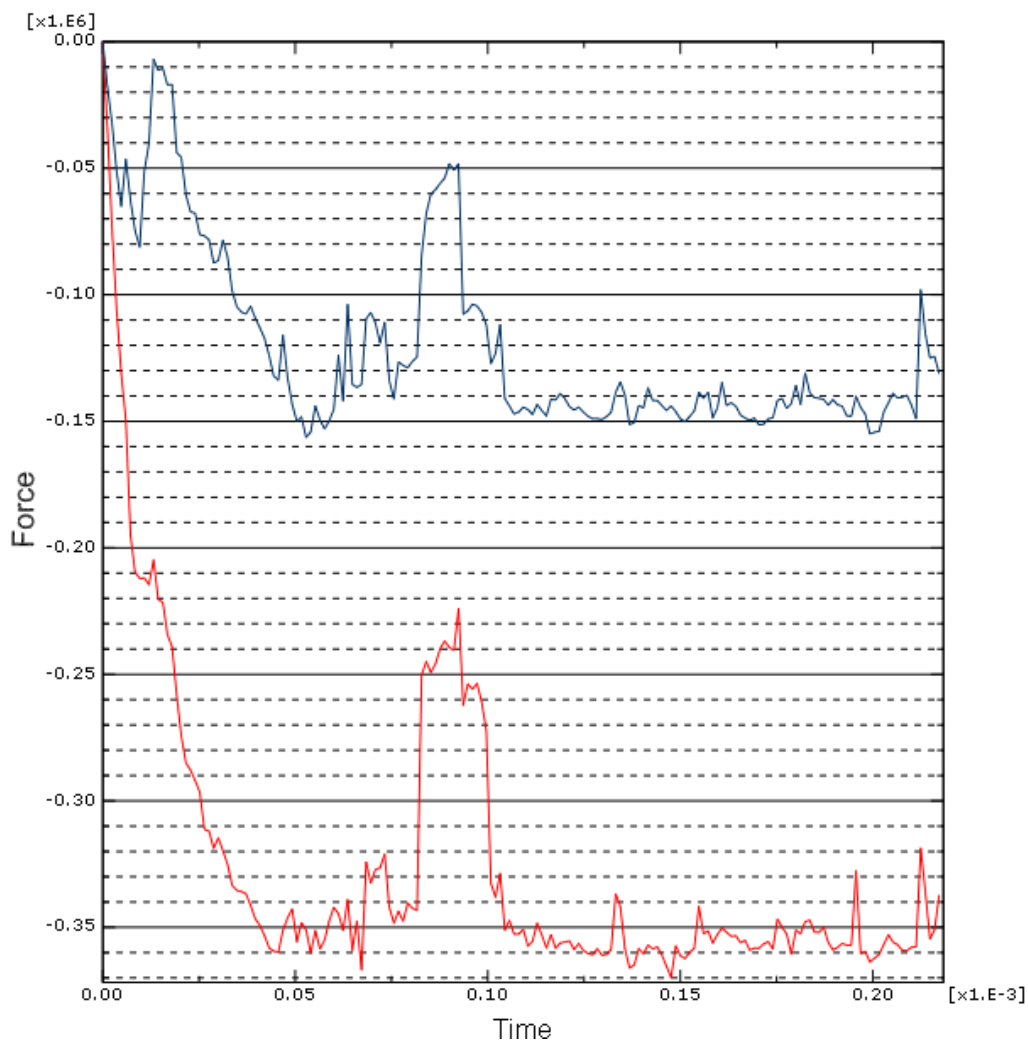


Imagen 31: Fuerzas de corte y avance,  $a = 0.16 \text{ mm}$  y  $v = 7 \text{ m/s}$

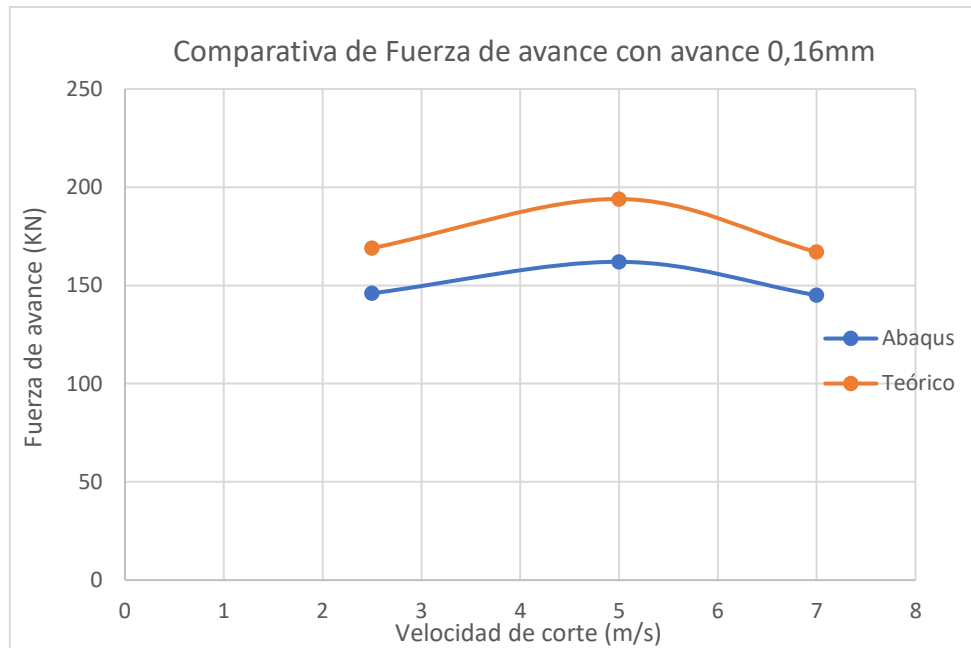
De nuevo en este caso se observa un aumento de las dos primeras etapas, disminuyendo el tiempo en el que la viruta se desarrolla de forma estable.

-  $F_a = 145 \text{ KN}$

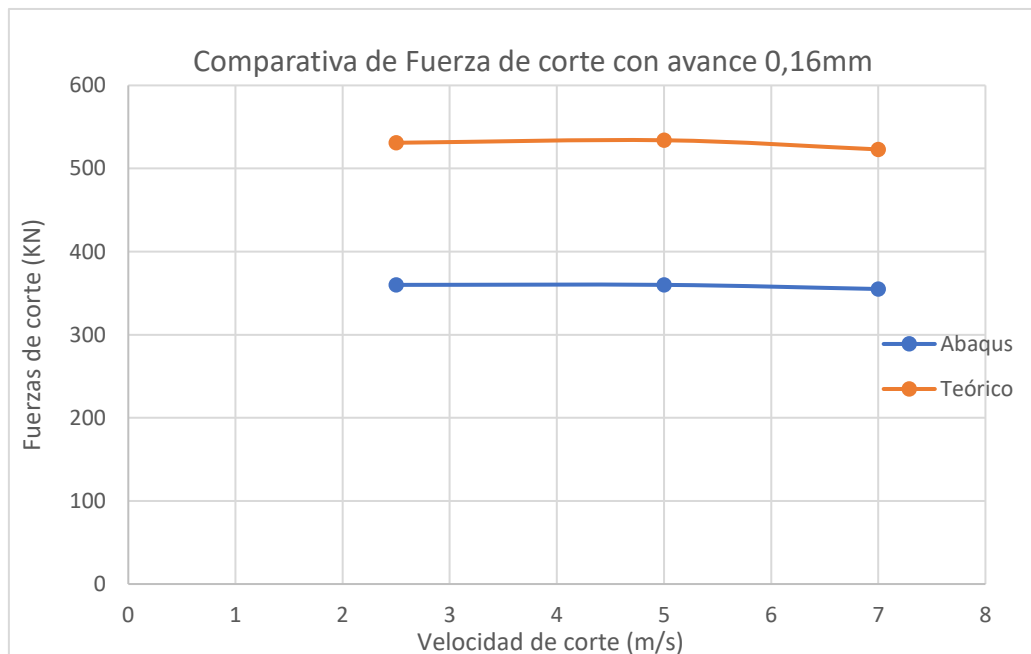
-  $F_c = 355 \text{ KN}$

Algo mayores que en el caso del avance de 0.12mm, pero no hay tanta diferencia como con la velocidad de 5m/s.

Las gráficas de fuerzas en este caso quedan de la siguiente forma:



Gráfica 3: Comparativa  $F_a$  avance 0.16mm



Gráfica 4: Comparativa  $F_c$  avance 0.16mm

#### 4.1.3. Avance de 0.24mm

- $v=2.5\text{m/s}$

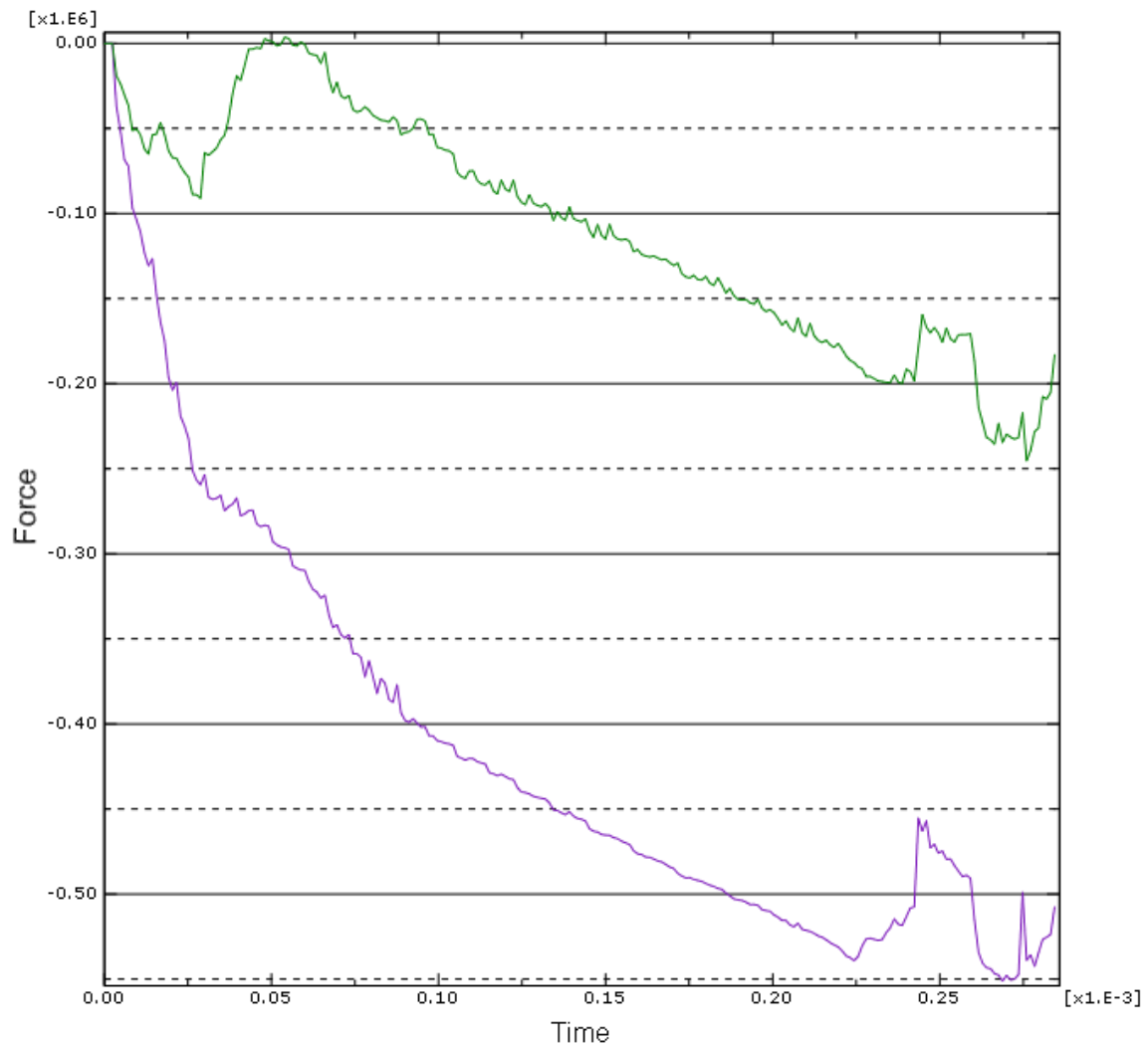


Imagen 32: Fuerzas de corte y avance,  $a=0.24\text{mm}$  y  $v=2.5\text{m/s}$

En este caso, se advierte un aumento de la primera etapa de la gráfica, de forma que no se puede determinar con exactitud la fuerza, ya que la viruta rompe antes de alcanzar el régimen estable, sin embargo, analizando las otras velocidades, se estiman los siguientes valores:

- $F_a = 190\text{KN}$
- $F_c = 525\text{KN}$

- $v=5\text{m/s}$

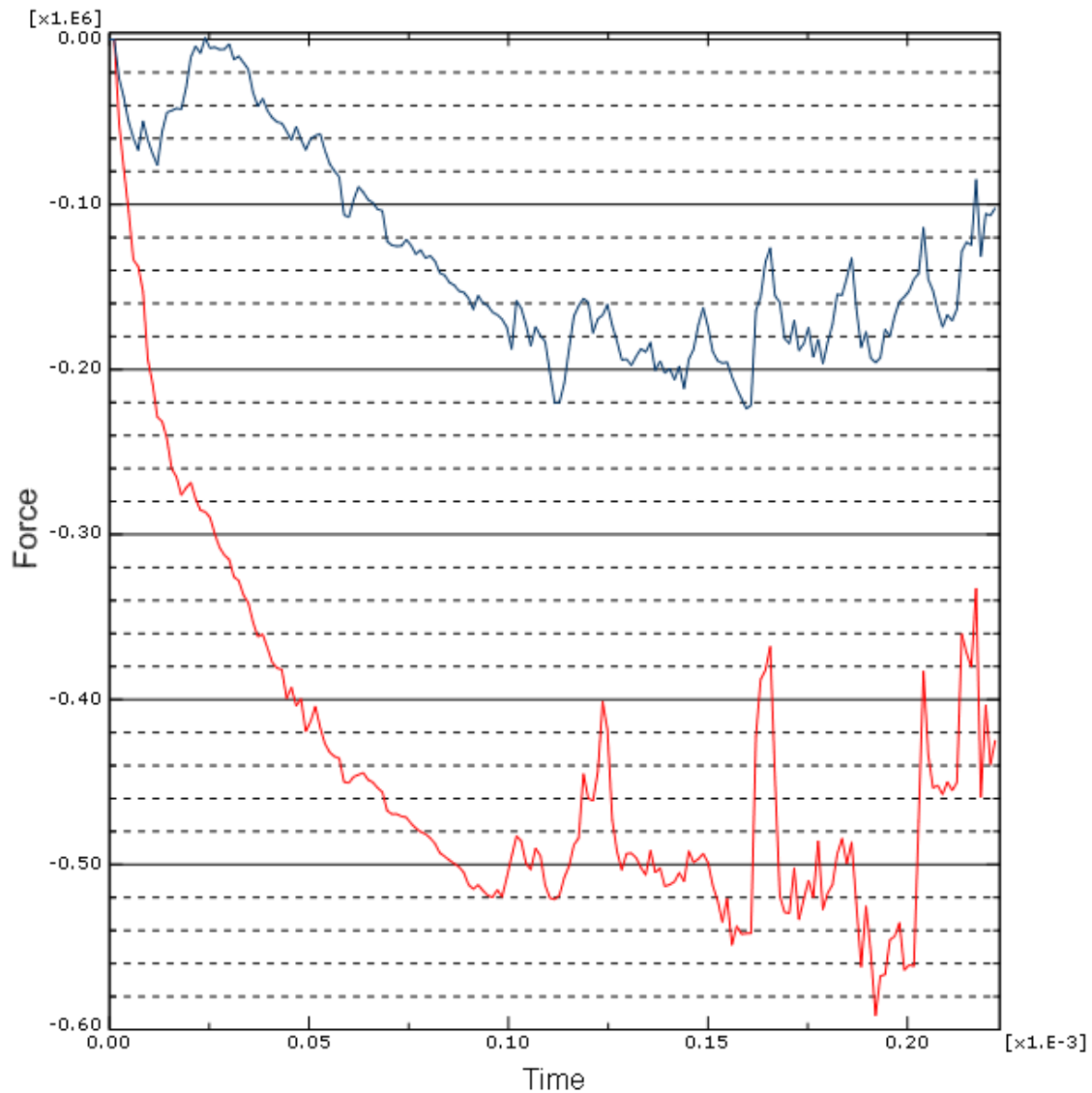


Imagen 33: Fuerzas de corte y avance,  $a=0.24\text{mm}$  y  $v=5\text{m/s}$

De la misma forma, en este caso, cuando la viruta se llega a estabilizar, es el momento en el que la viruta se separa del resto de material y empieza a deslizar sobre él. Por lo que, los resultados están en torno a estos valores:

- $F_a = 195\text{KN}$
- $F_c = 530\text{KN}$

- $v=7\text{m/s}$

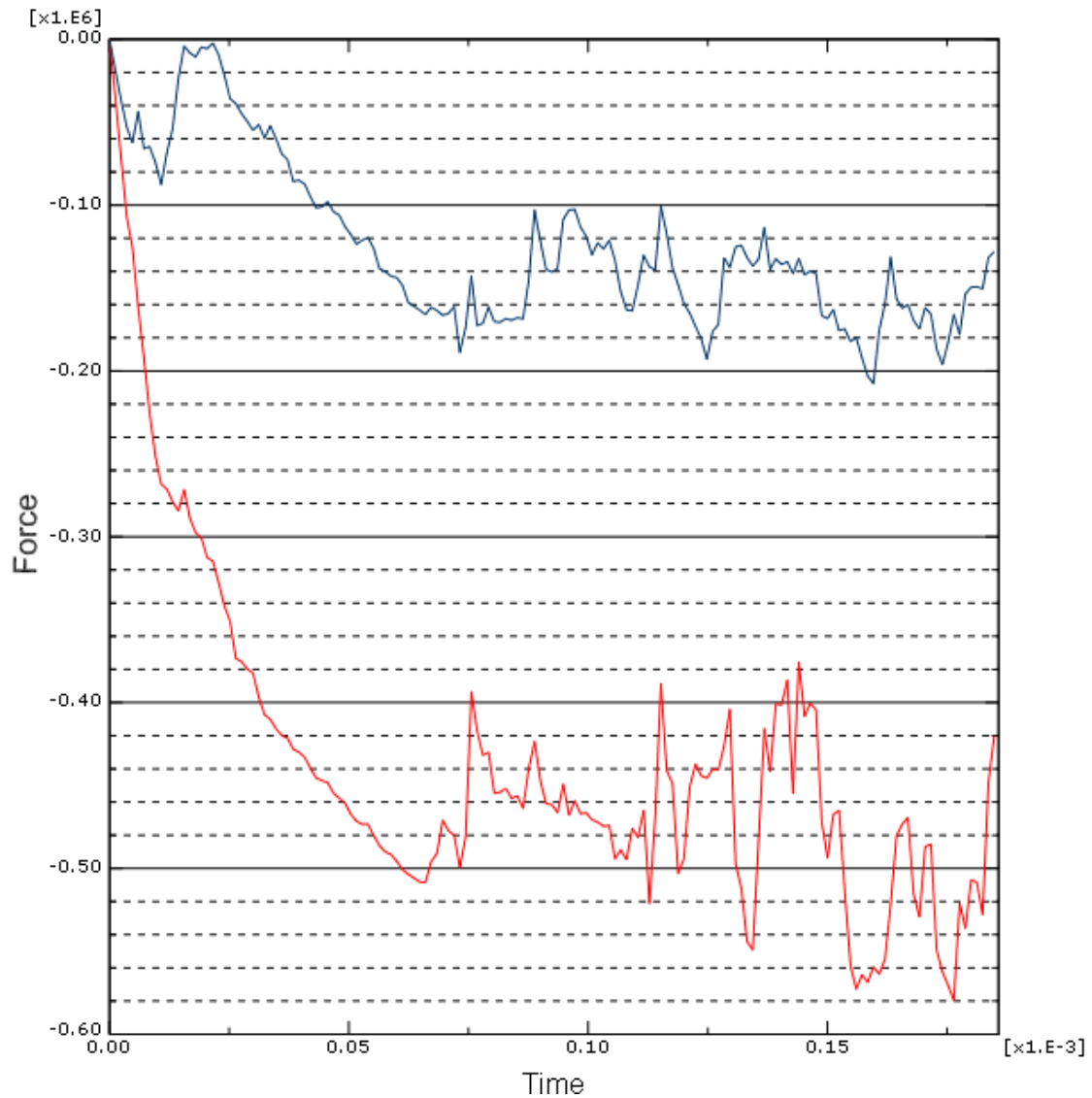


Imagen 34: Fuerzas de corte y avance,  $a=0.24\text{mm}$  y  $v=7\text{m/s}$

Por último, en este caso se observa como la viruta se separa del resto de material antes de llegar a estabilizarse. Los valores por lo tanto serán menores a los obtenidos en las velocidades menores:

- $F_a = 170\text{KN}$
- $F_c = 520\text{KN}$

Con estos valores, la gráfica queda de la siguiente forma:

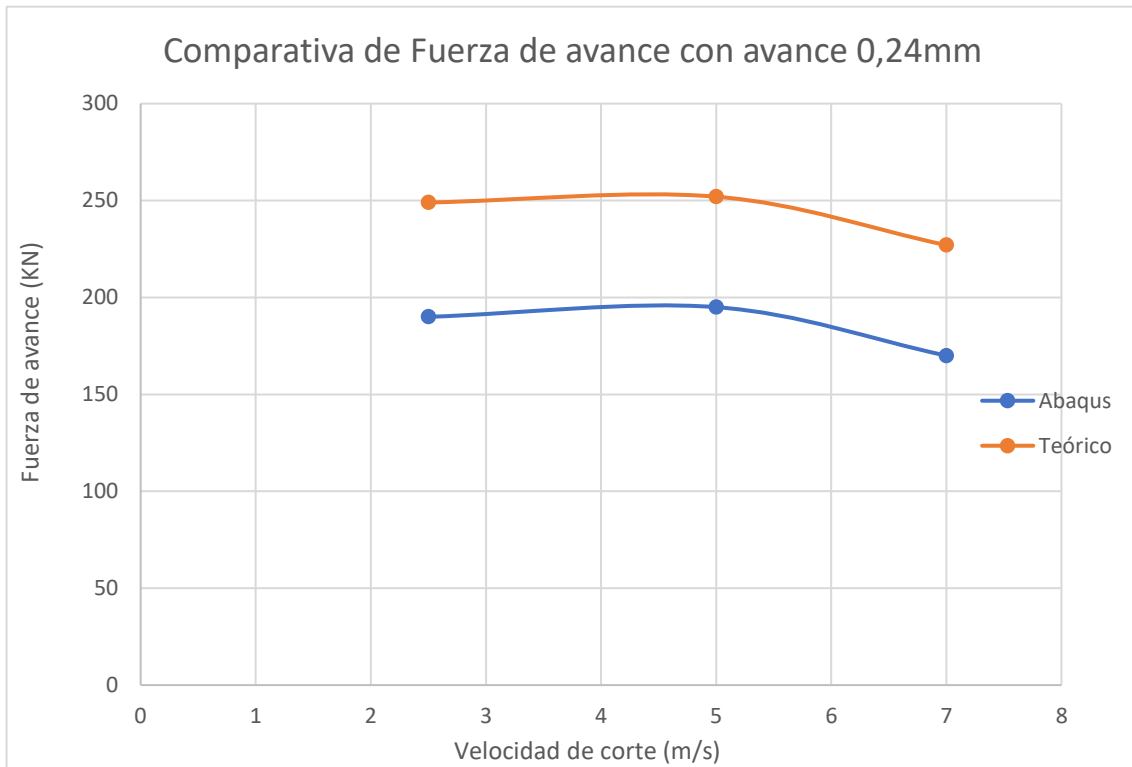


Imagen 35: Comparativa Fa avance 0.24mm

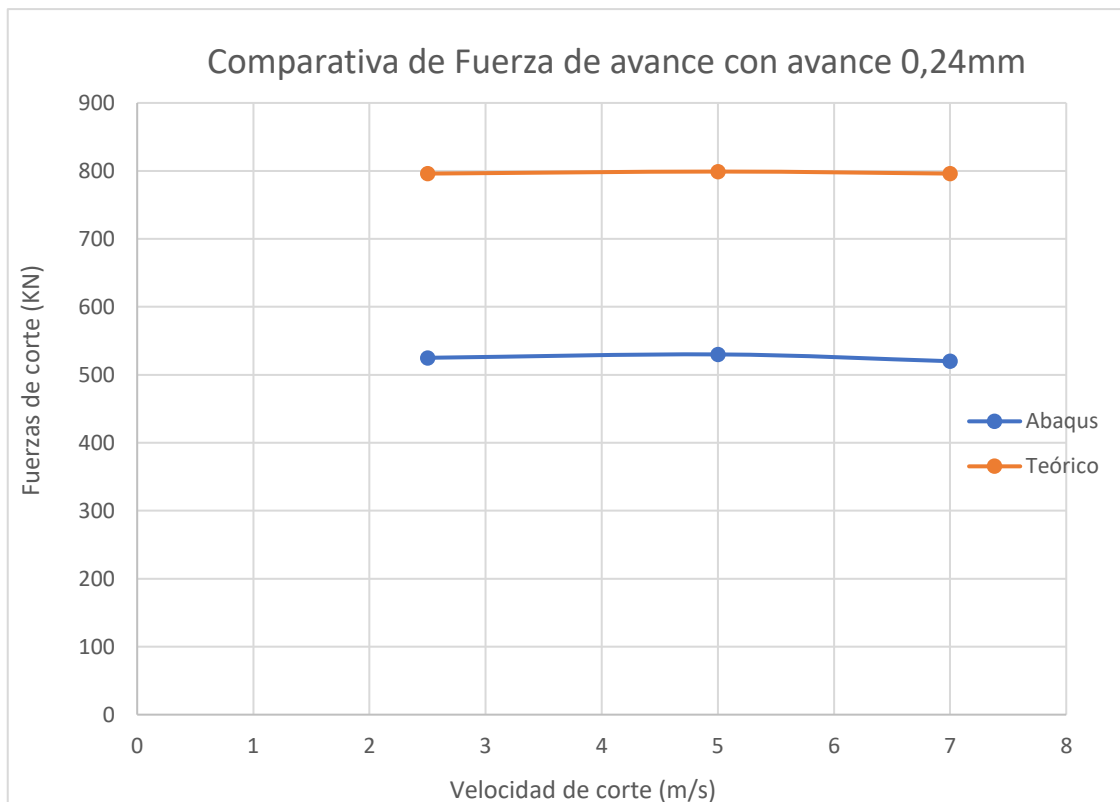


Imagen 36: Comparativa Fc avance 0.24mm

Debido la poca fiabilidad de los resultados, aunque se cumple la tendencia, en este estudio, no se puede dar valor con exactitud para avances tan grandes.



## 4.2. El efecto de los parámetros de Johnson-Cook

Una vez analizado el valor de la fuerza, se ha determinado que, si bien, el comportamiento del material coincide con lo que sucede en el estudio teórico, sigue sin darse explicación al hecho de que haya una diferencia entre las fuerzas de corte y de avance teóricas y experimentales, y, además, que esta diferencia se mantenga más o menos proporcional para las diferentes velocidades y avances. Como solución se ha determinado que este gap, podría deberse a los valores de la fórmula de Johnson Cook, ya que estos son valores experimentales para la simulación en ABAQUS. Para analizarlo, se va a estudiar el efecto que tiene el parámetro A sobre el problema, para ello se realizará el caso de 0.12mm de avance y 2.5mm/s, con  $A'=Ax1.2$ ,  $Ax1.3$ ,  $Ax1.4$  y  $Ax1.5$ .

Se ha escogido este caso, ya que era el más estable, y el que tenía una etapa estable más duradera.

### 4.2.1. $A'=Ax1.2$

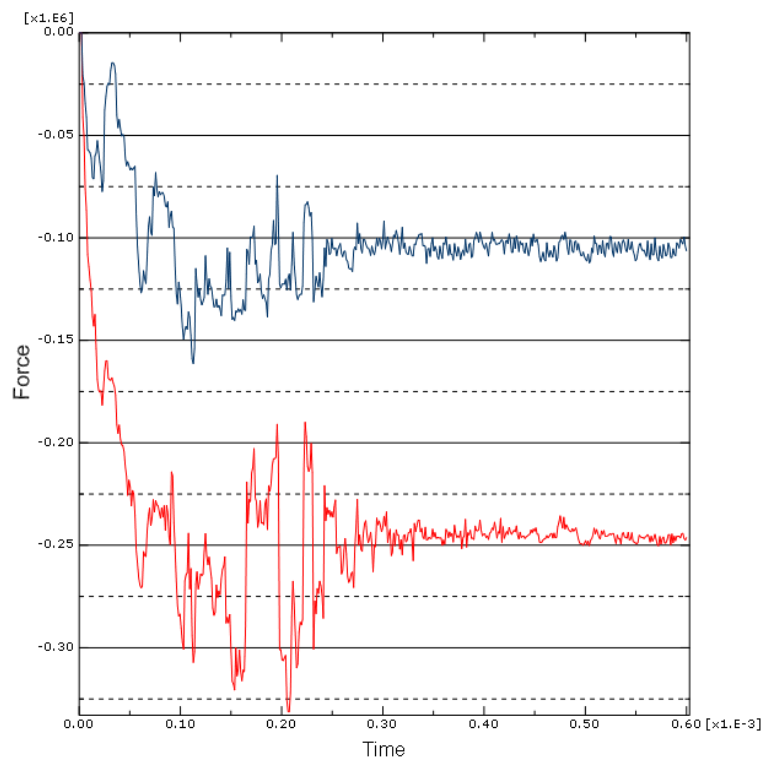


Imagen 37: Fuerzas  $A'=Ax1.2$

Aumentando A un 20%, se obtiene una gráfica de fuerzas mayor que con la A obtenida del estudio de Keyan Wang, por lo que, según este resultado, las fuerzas aumentan aumentando este parámetro.

#### 4.2.2. $A' = Ax1.3$

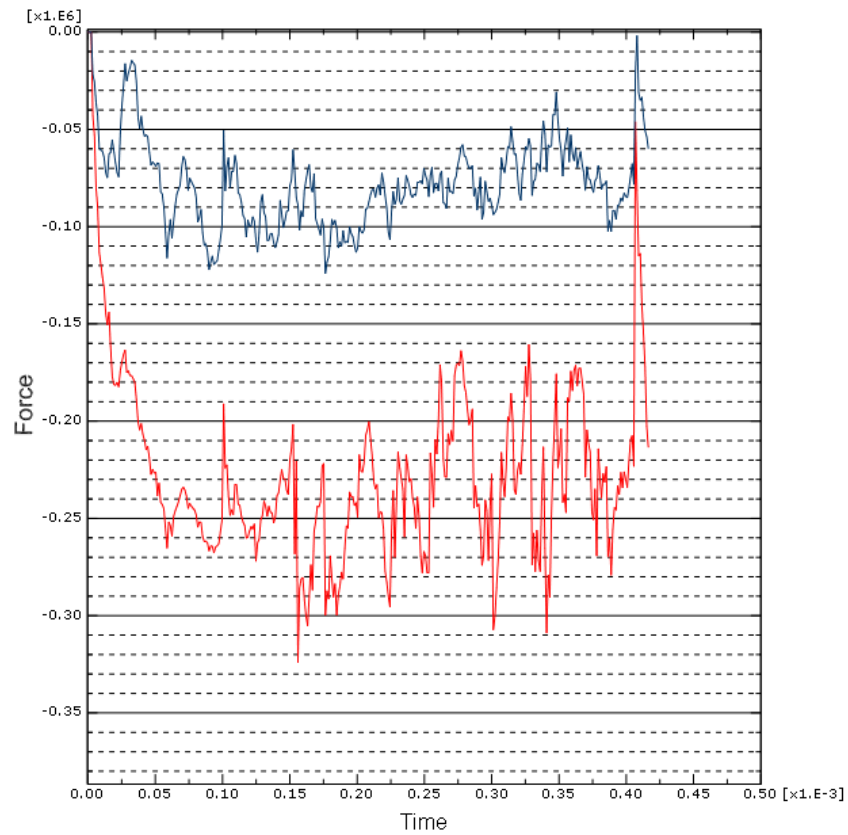


Imagen 38: Fuerzas  $A' = Ax1.3$

Aumentando  $A \cdot 1.3$ , se observa que viruta rompe en  $t = 0.44 \text{ ms}$ . Antes de esto, la viruta se había desarrollado de igual modo que en los casos anteriores, pero se observa en la gráfica, que el desarrollo de la viruta se ha visto afectado por el cambio de  $A$ .

#### 4.2.3. $A'=Ax1.4$

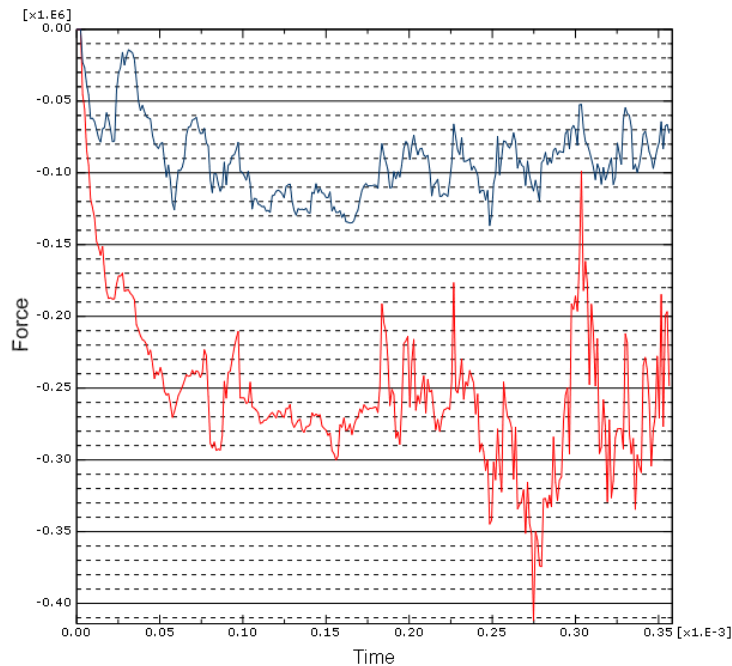


Imagen 39:: Fuerzas  $A'=Ax1.4$

En este caso observamos como si seguimos aumentando este parámetro, las fuerzas y la formación de viruta siguen la misma progresión, por lo que se sigue reafirmando la sospecha de que el valor de los parámetros principales de la ley de Johnson Cook, afectan en gran medida al proceso

#### 4.2.4. $A'=Ax1.5$

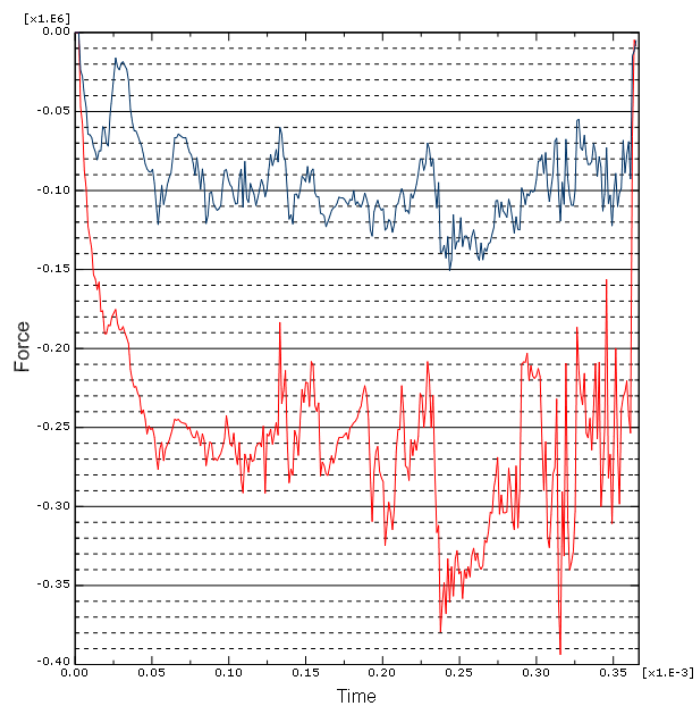
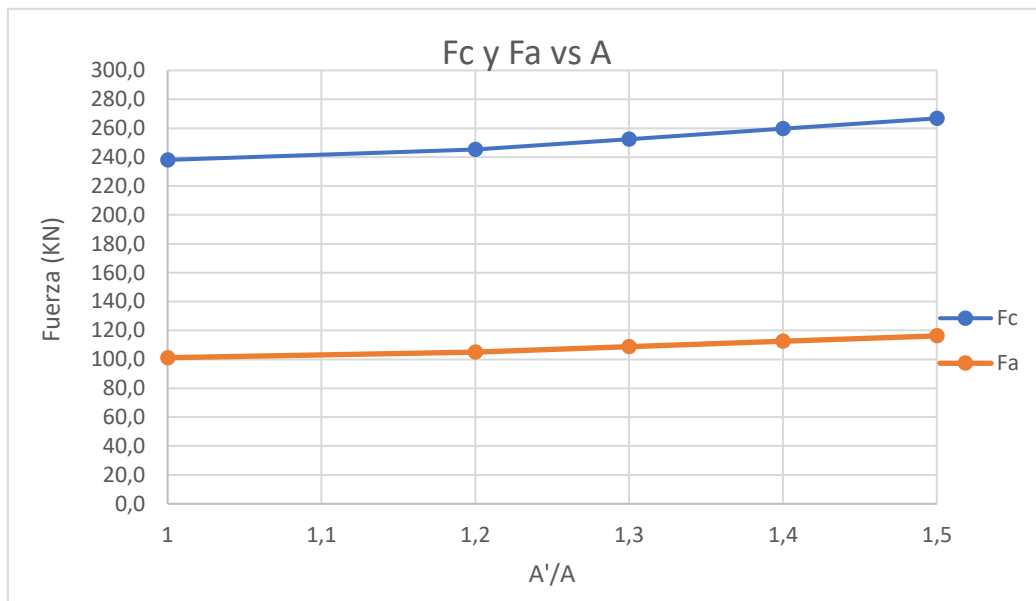


Imagen 40: Fuerzas  $A'=Ax1.5$

Comparando en una gráfica los valores obtenidos, obtenemos los siguientes resultados:



Gráfica 5: Evolución de  $F_c$  y  $F_a$  en función de  $A'$

Como se muestra en la gráfica, el valor de  $A$  influye en la obtención de resultados, y, por lo tanto, se puede afirmar que los parámetros principales de la ley de Johnson Cook, afectan en gran medida al cálculo de fuerza en este proceso.

## 5. CONCLUSIONES

Tras el análisis de todos los casos descritos anteriormente, se puede deducir:

- ✓ La progresión de las fuerzas de corte y avance se puede clasificar en 4 etapas.
- ❖ 1º etapa: Es la etapa en la que empieza el contacto entre la pieza y el material, sin llegar a romperle. Es una etapa muy corta, en la que suben las fuerzas rápidamente.
- ❖ 2º etapa: En esta etapa, se frena el aumento de las fuerzas de corte y avance, y empieza un tramo en el que estos valores son muy inestables. Esta etapa corresponde al inicio de la formación de viruta, en el que empieza el contacto entre esta y la superficie de desprendimiento de la herramienta.
- ❖ 3º etapa: Esta etapa es la más estable, en la que el contacto entre la viruta y la superficie de desprendimiento de la herramienta es casi continuo.
- ❖ 4º etapa: Por último, al llegar al final de la pieza, se produce una reducción drástica de las fuerzas a partir de que el área en la que la pieza está unida a la viruta es tan pequeña, que se parte y se produce el deslizamiento de esta.

Estas etapas se pueden observar en la siguiente imagen:

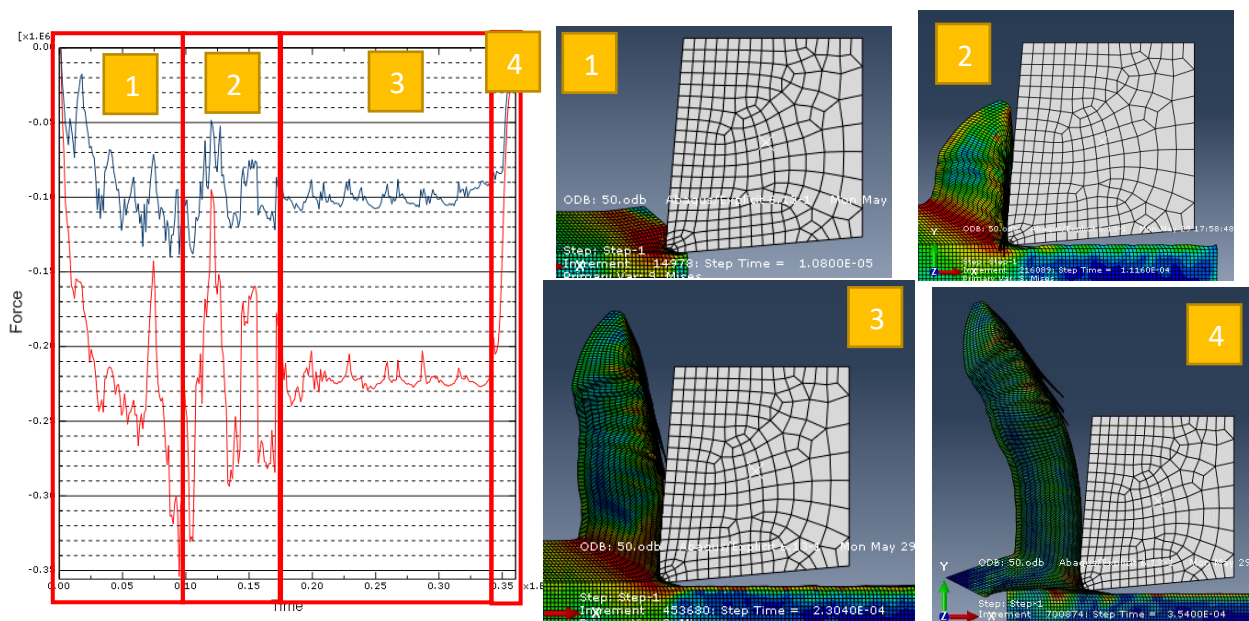
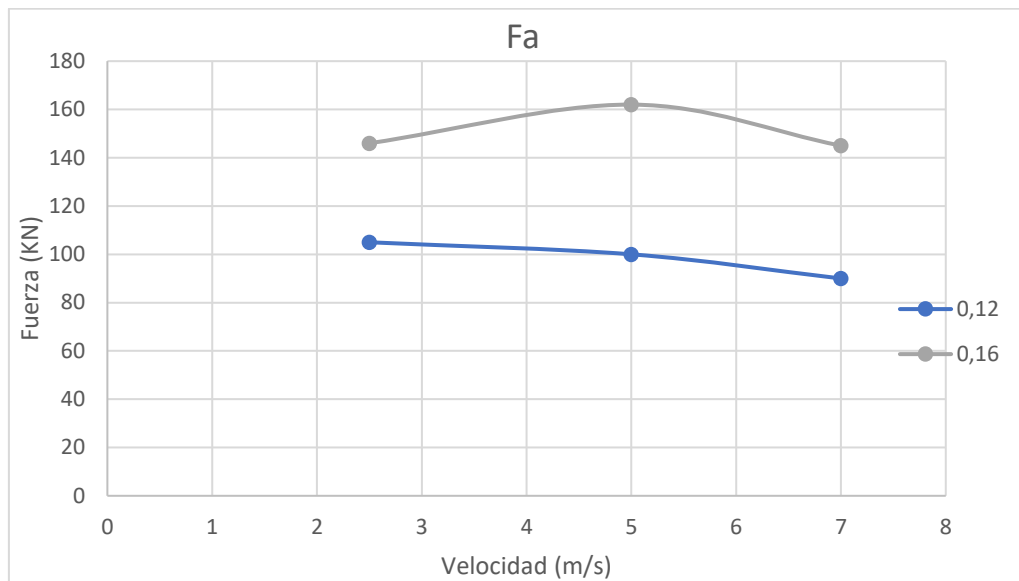
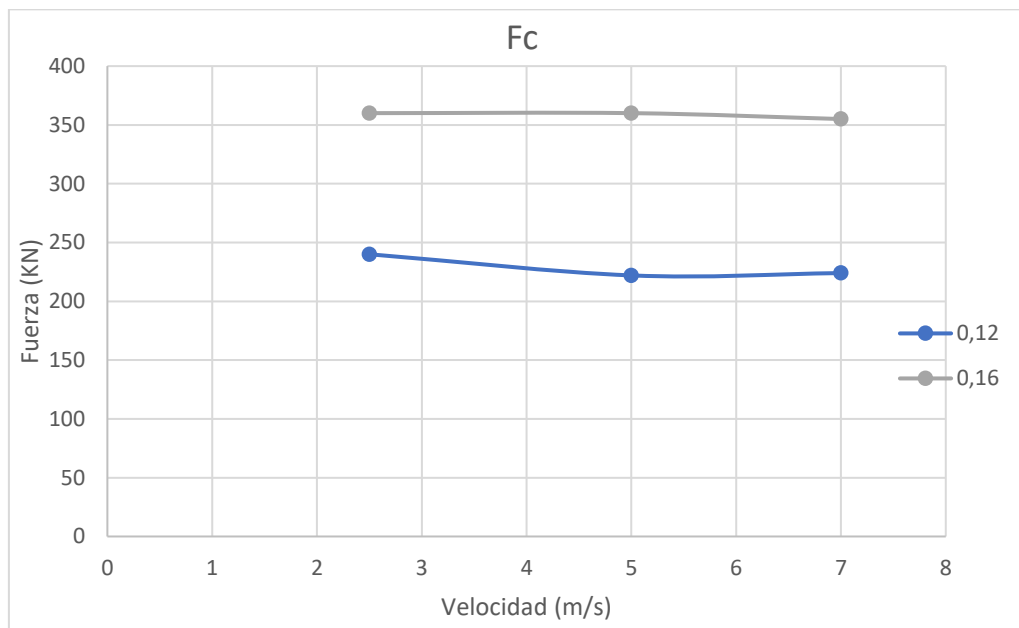


Imagen 41: Etapas de corte

- ✓ Existe una relación entre el avance y las fuerzas de corte, de forma que, si aumenta el avance, aumentan las fuerzas de corte y las de avance, la proporción es la siguiente:



Gráfica 6: Fa en función del avance.



Gráfica 7: Fc en función del avance

Sin embargo, como se puede apreciar, comparando los valores de Fc y Fa, esta proporcionalidad, no se cumple en cuanto a las velocidades de corte y las fuerzas resultantes.

- ✓ Como se puede observar en las imágenes del anexo A, el aumento del avance, influye sobre la formación de viruta, de forma que, aumentando el avance, aumenta el tiempo necesario para la formación de viruta. También, aumentando el avance, a mismas velocidades, se obtiene una viruta más discontinua.
- ✓ Como se puede observar en las imágenes del anexo A, el aumento de la velocidad de corte, también influye en la formación de viruta, de forma que, a velocidades más altas, es necesario más espacio para que la viruta se desarrolle, si bien, este aumento de velocidad, también produce una viruta más continua.
- ✓ Debido a estos dos factores, los resultados en el caso avance de 0.24mm y velocidades de 2.5m/s y 5m/s, la viruta rompía antes de desarrollarse completamente, y en el caso de 7m/s, el proceso acababa con la viruta sin desarrollarse.
- ✓ Comparando los resultados teóricos y los obtenidos en la simulación, se observa que este modelo consigue calcular unos valores de fuerza y avance coherentes en relación a los valores teóricos, si bien, habiendo realizado el estudio de la influencia del valor A en los resultados, será necesario un estudio previo para cada material de los parámetros influyentes en el modelo de rotura de Johnson Cook (ecuación 4) para obtener unos resultados más parecidos a la realidad. En este estudio, se ha podido comprobar también, que el parámetro reológico A, tiene gran repercusión, no sólo en las fuerzas del proceso, sino también en la formación de la viruta, ya que vemos que, aumentando este parámetro, el límite elástico del material a la temperatura de referencia (25°C), la parte del layer se deforma en mayor medida, produciendo mayores deformaciones en la raíz de la viruta. Para estudios posteriores, sería de gran utilidad evidenciar el efecto del resto de parámetros reológicos sobre este proceso.

## 6. DESARROLLOS FUTUROS

Debido a la cantidad de variables en el proceso, existen diversidad de estudios que se podrían realizar en este proceso, usando los mismos parámetros, por ejemplo, se podría estudiar la variación de temperaturas o deformaciones que tienen lugar, además, se podría ver la influencia que tienen los parámetros de diseño de la herramienta (ángulo de incidencia, ángulo de corte, radio de filo de la herramienta), la sensibilidad del mallado, o los modelos de rotura.

Dentro de este estudio, se ha detectado la necesidad de estudiar la influencia de todos los parámetros reológicos del modelo de rotura de Johnson-Cook sobre las fuerzas del proceso.

Además, se podría implementar el estudio con la ley de Johnson Cook modificada, en la que se incluye la variabilidad de los parámetros con la temperatura:

- Modelo de Johnson-Cook:

$$\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) = [A + B \cdot \epsilon^n] \cdot \left[ 1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_f - T_0} \right)^m \right]$$

*Ecuación 4*

- Modelo de Johnson-Cook modificado:

$$\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) = g(\epsilon) \cdot \Gamma(\dot{\epsilon}) \cdot \theta(\dot{\epsilon}, T)$$

*Ecuación 5: Johnson Cook modified*

donde:

- Endurecimiento por deformación (g):

$$g(\epsilon) = \begin{cases} A + B \cdot \epsilon^n & \text{si } \epsilon < \epsilon_{cut} \\ A + B \cdot \epsilon_{cut}^n & \text{si } \epsilon > \epsilon_{cut} \end{cases}$$

*Ecuación 6: Endurecimiento por deformación*

- Multiplicador de sensibilidad de frecuencia ( $\Gamma$ ):

$$\Gamma(\dot{\epsilon}) = \begin{cases} \left( 1 + \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{\frac{1}{m1}} & \text{si } \dot{\epsilon} < \dot{\epsilon}_t \\ \left( 1 + \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{\frac{1}{m2}} \cdot \left( 1 + \frac{\dot{\epsilon}_t}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{\frac{1}{m1} - \frac{1}{m2}} & \text{si } \dot{\epsilon} > \dot{\epsilon}_t \end{cases}$$

*Ecuación 7: Multiplicador de sensibilidad de frecuencia*



- Multiplicador térmico ( $\theta$ )

$$\theta(\dot{\epsilon}, T) = \begin{cases} 1 & \text{si } T \leq T_{\text{ambiente}} \\ 1 - \left[ \frac{T - T_{\text{ambiente}}}{T_{\text{cut}} - T_{\text{ambiente}}} \right] \cdot h(\dot{\epsilon}) & \text{si } T < T_{\text{cut}} \\ (1 - h(\dot{\epsilon})) \cdot \left( 1 - \left[ \frac{T - T_{\text{cut}}}{T_f - T_{\text{cut}}} \right] \right) & \text{si } T_{\text{cut}} \leq T < T_f \\ 0 & \text{si } T \geq T_f \end{cases}$$

Ecuación 8: Multiplicador Térmico

- Ablandamiento térmico ( $h$ )

$$h(\dot{\epsilon}) = \frac{\dot{\epsilon}_h + C_{\text{cut}} \cdot \dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_h + \dot{\epsilon}}$$

Ecuación 9: Ablandamiento térmico

Se observa que el estudio depende de la temperatura y que, a partir del régimen viscoso, estas propiedades cambian, la deformación en la que cambia el régimen es  $\epsilon_{\text{cut}}$ .

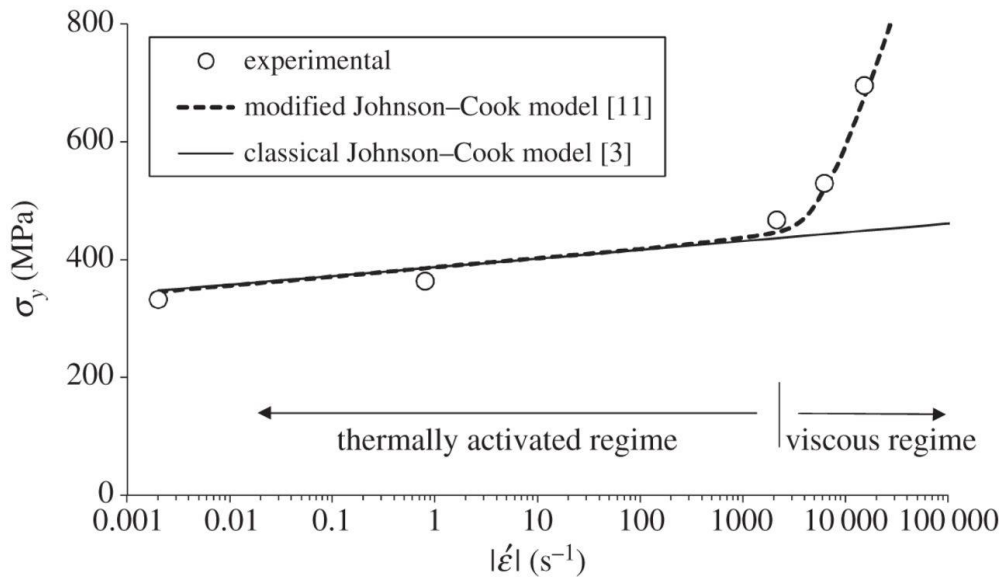


Imagen 42: Johnson Cook vs Johnson Cook modified

No se ha realizado debido a que no está incluida en la librería de ABAQUS, por lo que se debe programar, para ello serán necesarios conocimientos avanzados en programación para escribir la ley y posteriormente crear una subrutina que sustituya la ley de Johnson Cook por la ley de Johnson Cook modificada.

## 7. ANEXOS

### ANEXO A: IMÁGENES PROCESO DE CORTE

El Cálculo de las Fuerzas de corte y avance

Avance 0.12

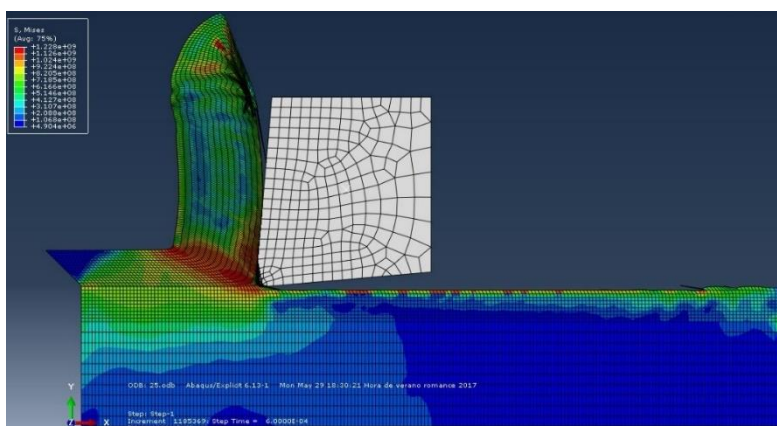


Imagen 43: corte  $a=0.12$   $v=2.5\text{m/s}$

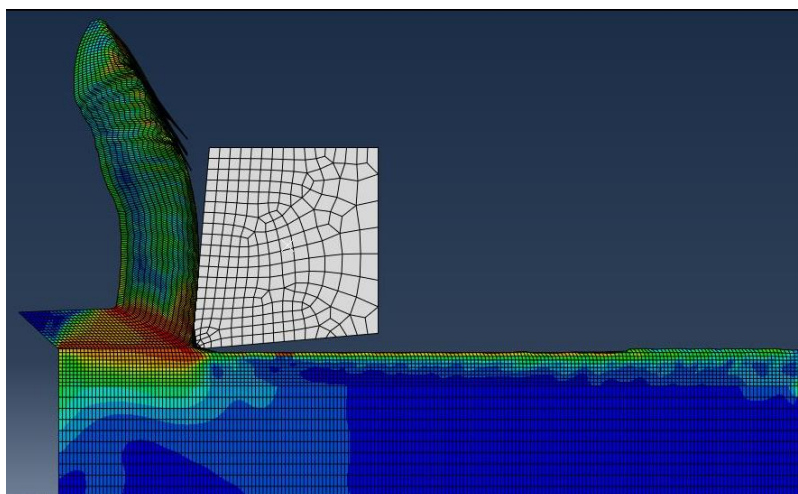


Imagen 44: corte  $a=0.12$   $v=5\text{m/s}$

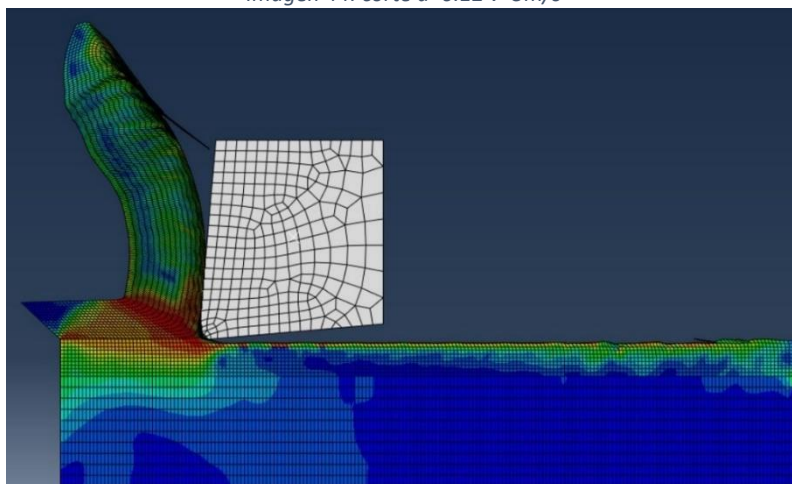


Imagen 45: corte  $a=0.12$   $v=7\text{m/s}$

Avance 0.16

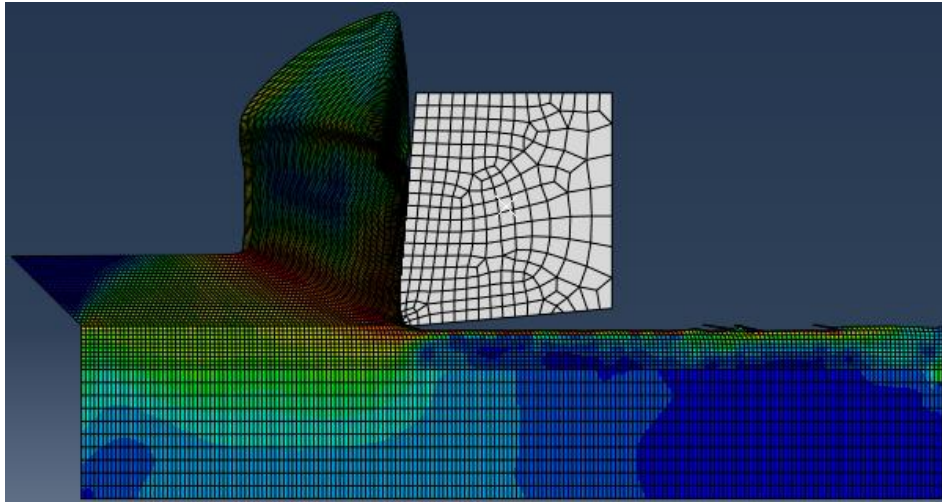


Imagen 46: corte  $a=0.16$   $v=2.5\text{m/s}$

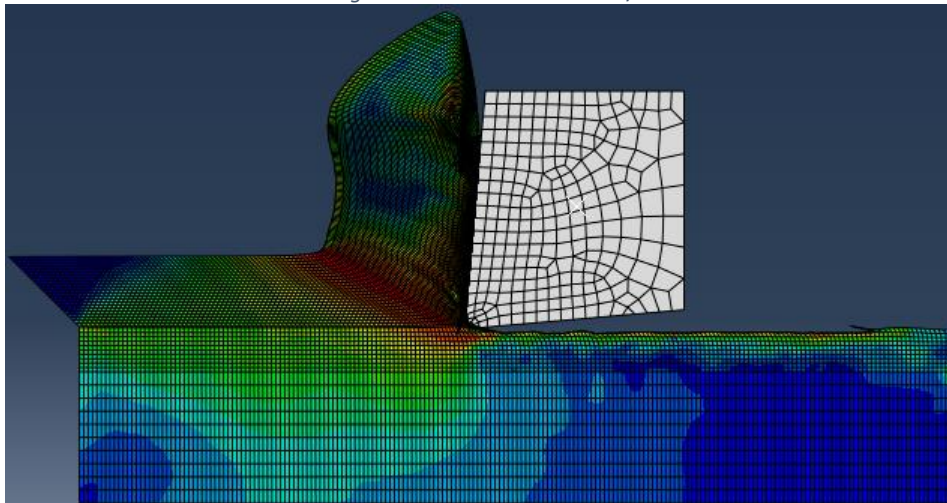


Imagen 47: corte  $a=0.16$   $v=5\text{m/s}$

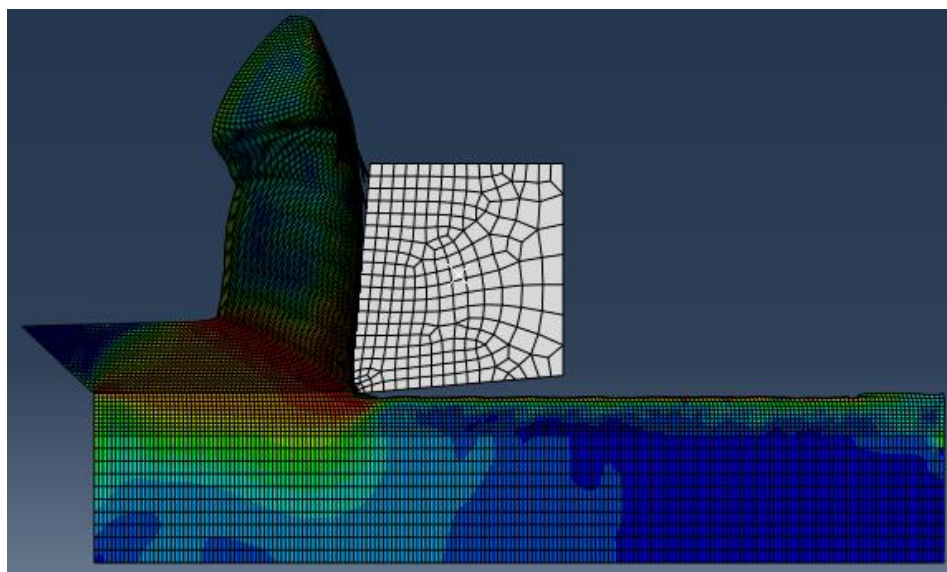


Imagen 48: corte  $a=0.16$   $v=7\text{m/s}$



Avance 0.24

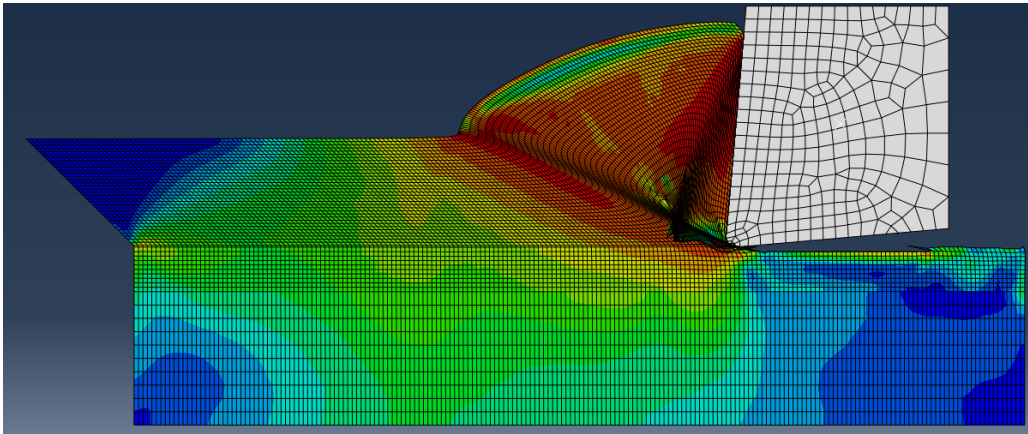


Imagen 49: corte  $\alpha=0.24$   $v=2.5\text{m/s}$

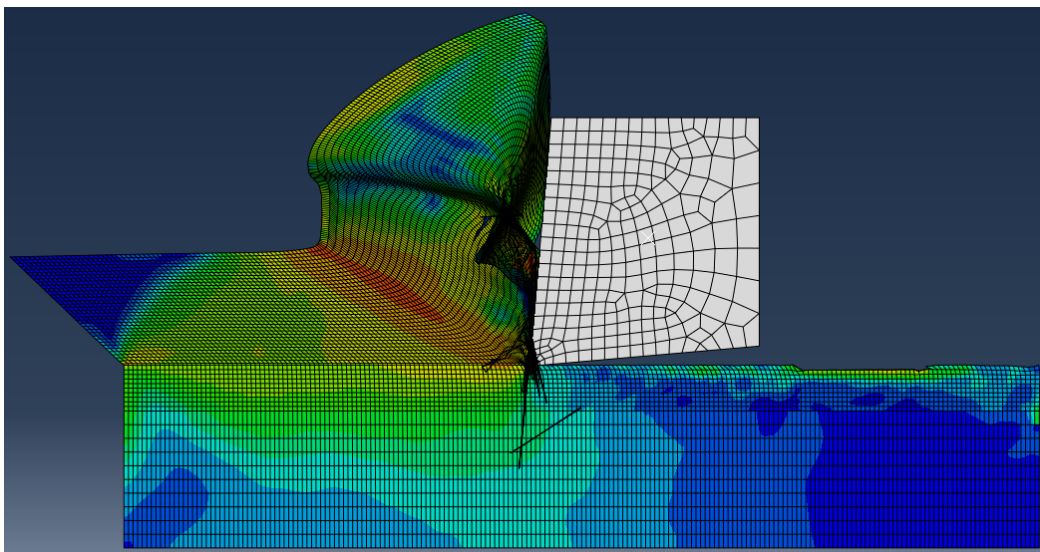


Imagen 50: corte  $\alpha=0.24$   $v=5\text{m/s}$

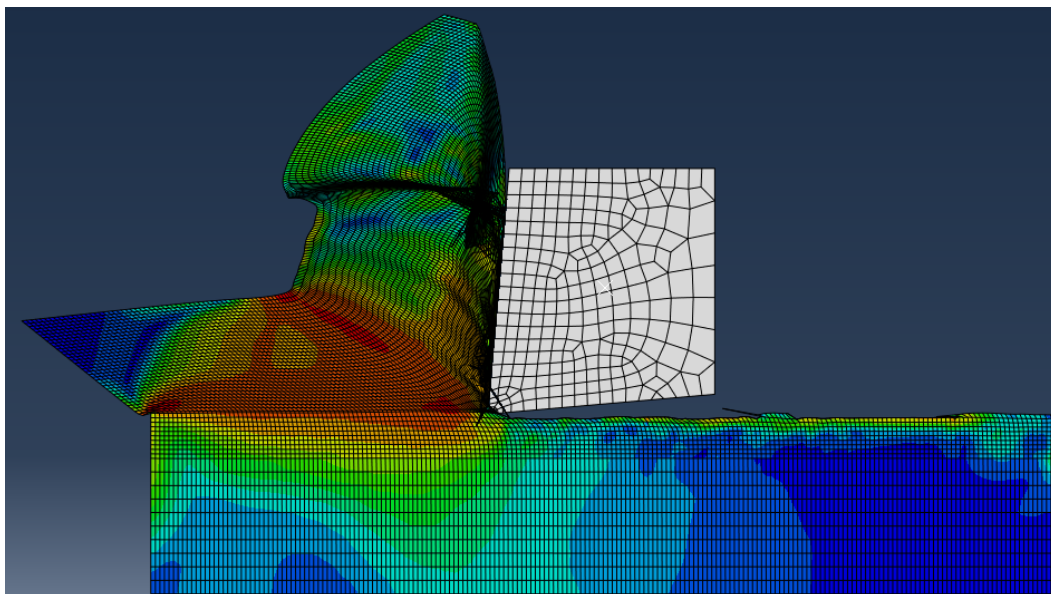


Imagen 51: corte  $\alpha=0.24$   $v=7\text{m/s}$

## El efecto de los parámetros de Johnson-Cook

$$A'=1.2*A$$

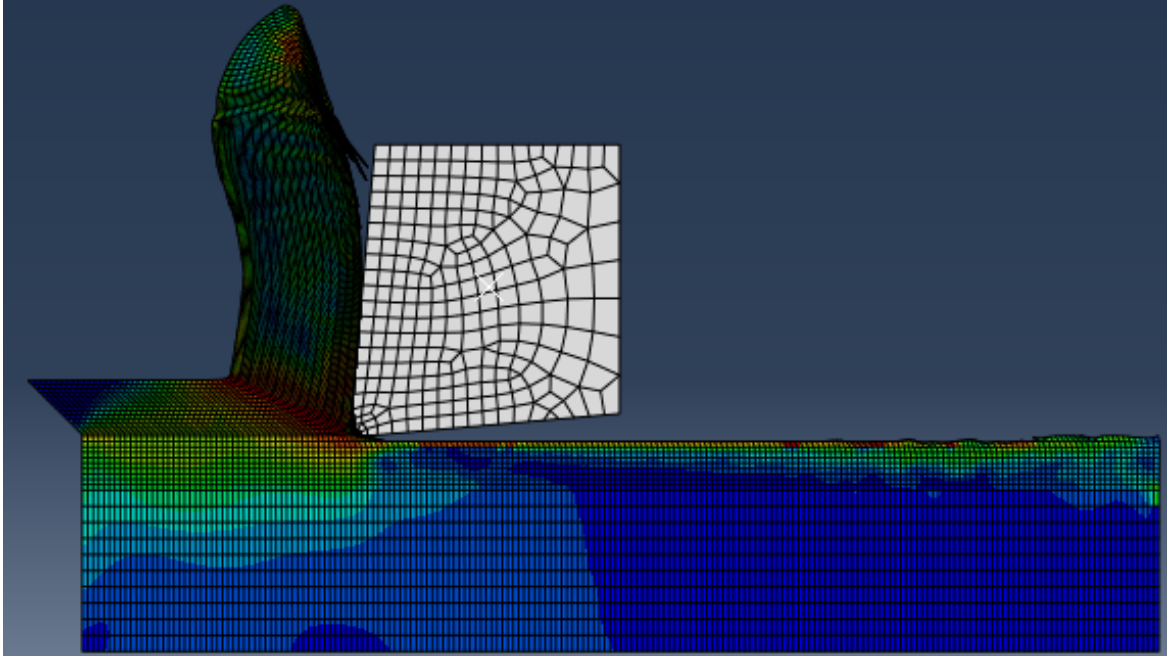


Imagen 52:  $A'=0.12$ ;  $a=0.12$   $v=2.5\text{m/s}$

$$A'=1.3*A$$

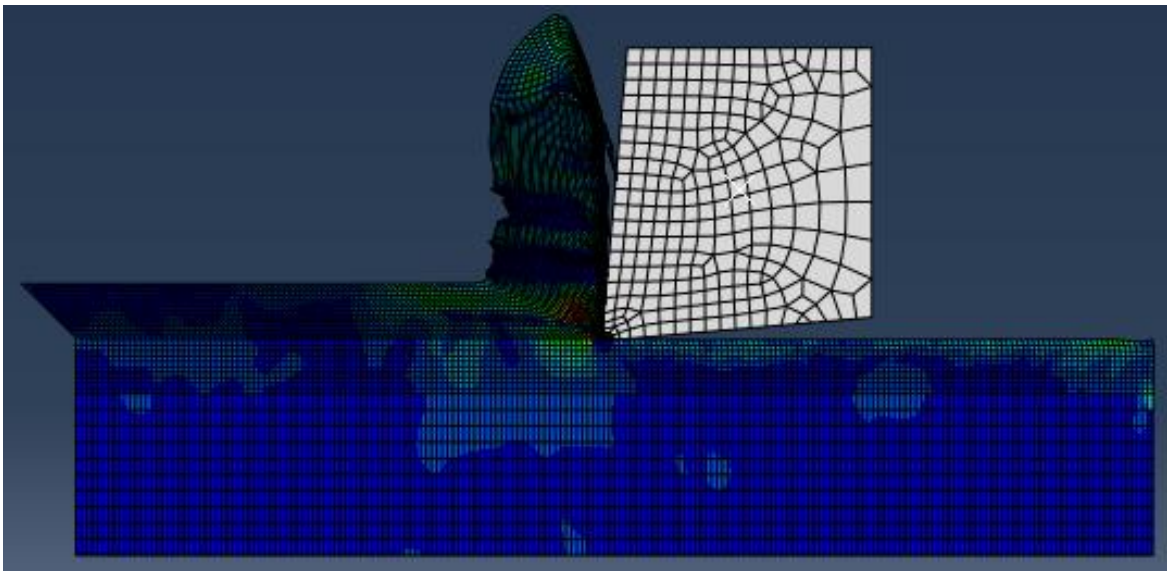


Imagen 53:  $A'=0.13$ ;  $a=0.12$   $v=2.5\text{m/s}$

$$A' = 1.4 * A$$

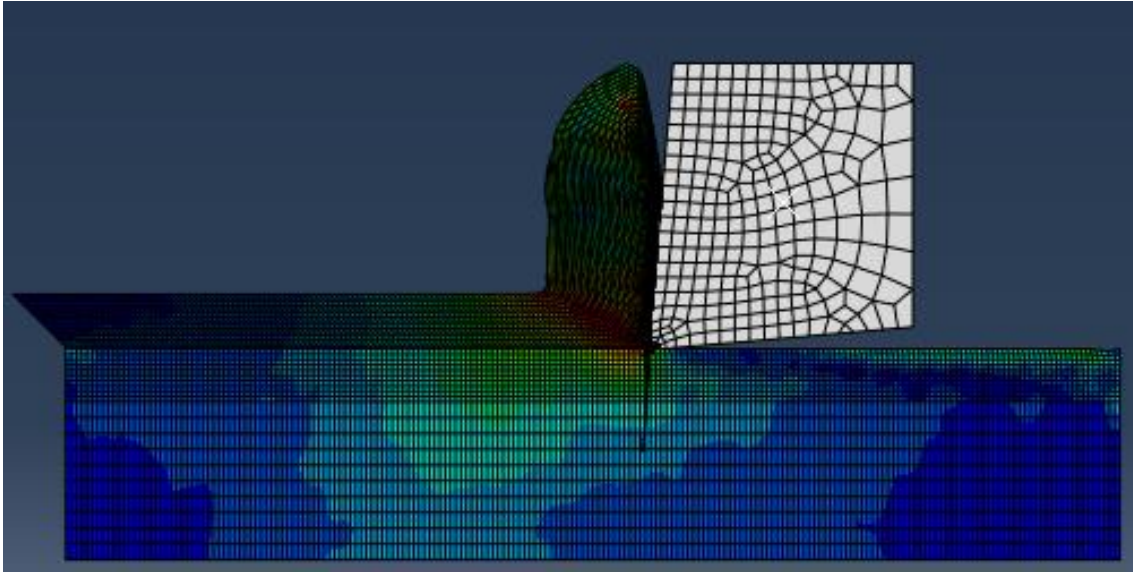


Imagen 54:  $A' = 0.14$ ;  $a = 0.12$   $v = 2.5 \text{ m/s}$

$$A' = 1.5 * A$$

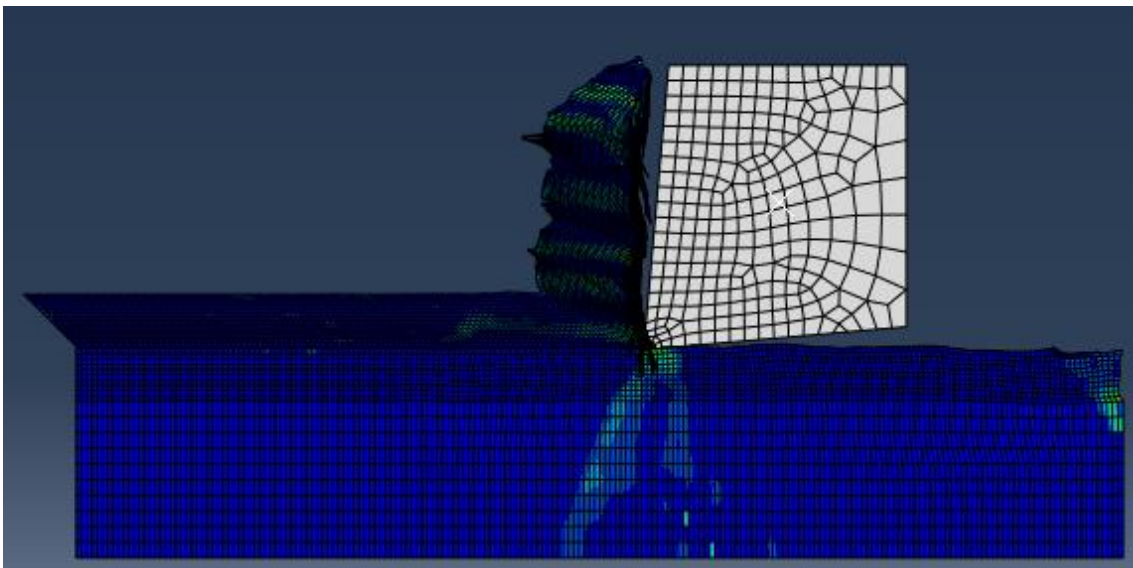


Imagen 55:  $A' = 0.15$ ;  $a = 0.12$   $v = 2.5 \text{ m/s}$

## ANEXO B: Datos de fuerzas

### Avance 0.12

0,12					
Abaqus			Teórico		
velocidad	Fa	Fc	velocidad	Fa	Fc
2,5	105	240	2,5	133	398
5	100	222	5	124	386
7	90	224	7	113	387

Tabla 8: Valores de Fa y Fc  $\alpha=0.12$

### Avance 0.16

0,16					
Abaqus			Teórico		
velocidad	Fa	Fc	velocidad	Fa	Fc
2,5	146	360	2,5	169	531
5	162	360	5	194	534
7	145	355	7	167	523

Tabla 9: Valores de Fa y Fc  $\alpha=0.16$

### Avance 0.24

0,24					
Abaqus			Teórico		
velocidad	Fa	Fc	velocidad	Fa	Fc
2,5	190	525	2,5	249	796
5	195	530	5	252	799
7	170	520	7	227	796

Tabla 10: Valores de Fa y Fc  $\alpha=0.24$

### Parametrización de A

	Fc	Fa	
$A'=A$	238,1	101,1	1
$A'=A*1,2$	245,3	104,9	1,2
$A'=A*1,3$	252,4	108,7	1,3
$A'=A*1,4$	259,6	112,5	1,4
$A'=A*1,5$	266,8	116,2	1,5

Tabla 11:: Valores de Fa y Fc  $\alpha=0.12$ ,  $v=2.5m/s$  en función de A'

## ANEXO D: Estructura de los archivos .inp

Dentro de estos archivos, queda recogida toda la información del modelo ABAQUS, manteniendo la siguiente estructura:

```
*Heading
** Job name: 7_016 Model name: Model-1
** Generated by: Abaqus/CAE 6.13-1
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
** PARTS
**
*Part, name=Tool
*Node
    1, 4.99994349e-05, 1.99250862e-05
    2, 9.56612566e-05, 0.000541842077
    3, 5.1088773e-05, 1.34133279e-05
    4, 5.4238848e-05, 7.61103001e-06
    5, 6.51610098e-05, 5.17724573e-07
    6, 7.17428702e-05, 0.
    7, 0.000549999997, 4.18420786e-05
    8, 0.000549999997, 0.000541842077
    9, 5.09507227e-05, 3.07983573e-05
    10, 5.25362047e-05, 4.89204758e-05
    11, 5.5072971e-05, 7.79158654e-05
    12, 5.76097409e-05, 0.000106911255
    13, 6.01465072e-05, 0.000135906637
    14, 6.26832771e-05, 0.000164902027
*Element, type=CPE3T
1, 269, 67, 66
2, 71, 32, 31
3, 278, 133, 135
4, 213, 184, 155
5, 223, 231, 230
6, 231, 212, 224
7, 127, 87, 111
*Element, type=CPE4RT
    8, 26, 25, 93, 266
    9, 122, 117, 23, 22
    10, 95, 268, 27, 5
    11, 268, 66, 4, 27
    12, 97, 68, 96, 82
    13, 1, 3, 67, 68
    14, 9, 1, 68, 267
    15, 267, 89, 10, 9
    16, 104, 102, 80, 74
    17, 165, 126, 276, 150
    18, 106, 105, 132, 281
    19, 28, 23, 22, 22
*Nset, nset=_PickedSet7, internal, generate
    1, 287, 1
*Elset, elset=_PickedSet7, internal, generate
    1, 257, 1
** Section: Tool
*Solid Section, elset=_PickedSet7, material=CBN
,
*End Part
**
```

Descripción del numérica de cada Part, en el ejemplo Part, y al final, las restricciones internas en skecth y el material asignado.

Imagen 56: DESCRIPCION INP1



```

** ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name=Part-2-1, part=Workpiece
    0., 4e-06, 0.
*End Instance
**
*Instance, name=Part-3-1, part=Tool
    -5.2e-05, 0., 0.
*End Instance
**
*Node
    1, 1.79997587e-05, 1.99238948e-05, 0.
*Nset, nset=_PickedSet64, internal
    1,
*Nset, nset=_PickedSet65, internal, instance=Part-3-1, generate
    1, 287, 1
*Elset, elset=_PickedSet65, internal, instance=Part-3-1, generate
    1, 257, 1
*Nset, nset=_PickedSet67, internal, instance=Part-2-1
    5, 6, 7, 8, 9, 10, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436
    437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452
    453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468
    469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484
    485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500
    501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516
.....

*Elset, elset=_PickedSurf66_S4, internal, instance=Part-3-1
    22, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 59, 69
*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf66, internal
    _PickedSurf66_S1, S1
    _PickedSurf66_S3, S3
    _PickedSurf66_S2, S2
    _PickedSurf66_S4, S4
*Surface, type=NODE, name=_PickedSet67_CNS_, internal
    _PickedSet67, 1.
** Constraint: Constraint-1
*Rigid Body, ref node=_PickedSet64, elset=_PickedSet65, position=CENTER OF MASS
*End Assembly
**
** MATERIALS
**
** Basic Units: Force (N), Length (m), mass (t), Temperature (K), Time (s),
** Energy (W), Work (J)
**
** Conductivity: W/(m·K)
** Density: kg/m^3
** Youngs Modulus: N/m^2
** Poisson: [Dimensionless]
** Specific Heat: J/(kg·K)
** Expansion Coefficient: 1/K or (1/°C)
** Conductance: (m^2·K)/W
*Material, name="AISI 1050 BASE"
*Conductivity
    51.5,
*Damage Initiation, criterion=JOHNSON COOK|
    0.04, 1.03, -1.39, 0.002, 0.46, 1623., 298., 1.
*Damage Evolution, type=ENERGY
    30000.,
*Density
    7850.,
*Elastic
    2.05e+11, 0.29
*Inelastic Heat Fraction
    .
486.,
** Basic Units: Force (N), Length (m), mass (t), Temperature (K), Time (s),
** Energy (W), Work (J)
**
** Conductivity: W/(m·K)
** Density: kg/m^3
** Youngs Modulus: N/m^2
** Poisson: [Dimensionless]
** Specific Heat: J/(kg·K)
** Expansion Coefficient: 1/K or (1/°C)
** Conductance: (m^2·K)/W
.....

```

Descripción  
numérica de los  
nodos del  
ensamblado

Propiedades de  
cada material

Imagen 57: DESCRIPCION INP2

```

** INTERACTION PROPERTIES
**
*Surface Interaction, name=IntProp-1
*Friction
0.46,
*Surface Behavior, pressure-overclosure=HARD
*Gap Conductance
10., 0.
0., 0.0003
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: Base_Constraints Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
_PickedSet72, ENCASTRE
** Name: Tool_Constrain Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet69, 2, 2
_PickedSet69, 6, 6
**
** PREDEFINED FIELDS
**
** Name: Initial_Temperature Type: Temperature
*Initial Conditions, type=TEMPERATURE
_PickedSet71, 293.
** -----
** STEP: Step-1
**
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES
*Dynamic Temperature-displacement, Explicit
, 0.0006
*Bulk Viscosity
0.06, 1.2
** Mass Scaling: Semi-Automatic
** Whole Model
*Variable Mass Scaling, dt=5e-10, type=below min, frequency=1
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: Tool_Velocity Type: Velocity/Angular velocity
*Boundary, type=VELOCITY
_PickedSet70, 1, 1, -5.
**
** INTERACTIONS
**
** Interaction: Int-1
*Contact Pair, interaction=IntProp-1, mechanical constraint=KINEMATIC, cpset=Int-1
_PickedSurf66, _PickedSet67_CNS_
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, number interval=1, time marks=NO
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, number interval=500
*Node Output
A, NT, RF, RFL, U, V
*Element Output, directions=YES
DENSITY, E, EDCDEN, EDT, ELEDEN, ELEN, EMSF, ENER, ER, FV, HFL, LE, MFR, PE, PEEQ, S
SDV, STATUS, TEMP
*Contact Output
CFORCE, CSTRESS, PPRESS
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, time interval=1.2e-06
*Contact Output, cpset=Int-1
CFN1, CFN2, CFN3, CFNM, CFS1, CFS2, CFS3, CFSM, CFT1, CFT2, CFT3, CFTM
*End Step

```

Parámetros de  
“Interactions”

(en rojo el  
coeficiente de  
rozamiento)

Parámetros de  
“Load” en cada  
“step”

(en rojo la  
velocidad de la

Modelización  
numérica de  
“Interaction” y  
“Load”.

Imagen 58: DESCRIPCION INP3

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Soldani, X. (2009).** *MODELISATION ANALYTIQUE DE L'USINAGE A GRANDE VITESSE ET ETUDE DE L'USURE EN CRATERE – APPLICATION AU TOURNAGE.* Doctorado. Université Paul Verlaine - Metz.
  
- [2] **Kalpakjian, Serowe (2000).** *MANUFACTURING ENGINEERING AND TECHNOLOGY.* Prentice Hall.
  
- [3] **Keyan Wang, B. ENG (2016).** *CALIBRATION OF THE JOHNSON-COOK FAILURE PARAMETERS AS THE CHIP SEPARATION CRITERION IN THE MODELLING OF THE ORTHOGONAL METAL CUTTING PROCESS.* McMaster University
  
- [4] **Zorev, N. N. (1963).** *INTERRELATIONSHIP BETWEEN SHEAR PROCESS OCCURRING ALONG TOOL FACE AND SHEAR PLANE IN METAL CUTTING.* American Society of Mechanical Engineers.
  
- [5] **García de Lomana, J.M. (2009).** *ESTUDIO PARAMÉTRICO DEL PROCESO DE CORTE ORTOGONAL MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.* Universidad Carlos III de Madrid.
  
- [6] **Ocaña, M. (2011).** *ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE PROCESOS DE CORTE ORTOGONAL CON DISTINTOS REDONDEOS DE FILO.* Universidad Carlos III de Madrid.
  
- [7] **Ruiz-Castro, M. (2005).** *ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE LA LEY CONSTITUTIVA DE JOHNSON-COOK EN LOS RESULTADOS GLOBALES Y LOCALES Y DE LA CINEMÁTICA DE LA FORMACIÓN DE LA VIRUTA.* Universidad Carlos III de Madrid.
  
- [8] **Álvarez Fernández, L. R. (2009).** *ANÁLISIS POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE MODELO SIMPLIFICADO DE CORTE EN ALEACIONES LIGERAS DE INTERÉS AEROESPACIAL.* Doctorado. UNED.